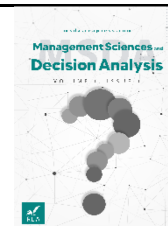
E-ISSN: | P-ISSN:



Management Sciences and Decision Analysis

www.msda.reapress.com

Manag. Sci. Decis. Anal. Vol. 2, No. 1 (2025) 65–90.



Paper Type: Original Article



Solving the Multi-Objective Power Plant Personnel Scheduling Problem Using Sparse Search Method

Parisa Shahnazari Shahrezaei[1,*], Hamed Kazemipour[1]

[1] Department of Industrial Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; parisa_shahnazari@yahoo.com; h.kazemipoor@iauctb. ac.ir.

Citation:



Shahnazari Shahrezaei, P., & Kazemipour, H. (2025). Solving the multi-objective power plant personnel scheduling problem using sparse search method. *Management sciences and decision analysis, 2*(1), 65-90.

Received: 16/07/2024 Reviewed: 22/08/2024 Revised: 20/09/2024 Accepted: 04/11/2024

Abstract

Purpose: Workforce planning and scheduling is an approach to arranging elements in a temporal or spatial pattern to achieve or approach various objectives, such that the constraints associated with these elements are entirely or almost satisfied. The first step of this process is to determine the number of employees required with specific skills to meet the demand at different times. In addition, all work rules and agreements must be considered during the process.

Methodology: For this purpose, in this paper, using mathematical programming, the specifications, conditions, regulations, and work agreements of the Shahid Solimi Neka Power Plant, as one of the country's strategic power plants and one of the most important national assets, are included in the problem. The workforce scheduling problem in this power plant involves various and contradictory constraints. Therefore, this research investigates the workforce scheduling problem using a multi-objective model. The proposed mathematical model has three objective functions: minimizing the number of workers with high-skill levels assigned to low-skill-level jobs, minimizing the wages paid to workers, and optimizing the use of workers. Due to the structure of the problem and its complexity, the problem is classified as a non-polynomial complex problem. Two meta-heuristic algorithms, sparse search and genetic with non-dominated sorting, have been generalized to solve the multi-objective model. Seven sample problems were solved using the generalized algorithms to evaluate the performance of the proposed algorithms.

Findings: In summary, solving problems of different sizes using performance index graphs and comparing the two algorithms show that the sparse search algorithm is better in two qualitative indices of quality and dispersion and that the genetic algorithm with non-dominated sorting performs better in the quantitative index of space uniformity.

Originality/Value: Implementing this model in power plants can improve operational efficiency, human resource productivity, and service quality.

Keywords: Manpower scheduling, Planning, Multi-objective model.



Corresponding Author: parisa_shahnazari@yahoo.com https://doi.org/10.22105/msda.v2i1.58





علوم مدیریت و تحلیل تصمیم

دوره ۲، شماره (۱)، (۱۴۰۴)، ۹۰-۶۵

www.msda.reapress.com





نوع مقاله: پژوهشی

حل مساله زمان‌بندی پرسنل نیروگاهی چندهدفه با استفاده از روش جست‌وجوی پراکنده

پریسا شاه‌نظری شاه‌رضائی[1,*]، حامد کاظمی پور[1]

[1]گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

هدف: برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نیروی‌انسانی یک رویکرد ترتیب‌دهی عناصر در یک الگوی زمانی یا مکانی به‌منظور رسیدن یا نزدیک شدن به اهداف گوناگونی است، به‌طوری‌که محدودیت‌های مرتبط با این عناصر کاملا یا تقریبا برآورده شوند. درحقیقت، اولین گام از این فرآیند، تعیین تعداد کارکنان موردنیاز با مهارت‌های خاص به‌منظور تامین تقاضا در زمان‌های مختلف می‌باشد. علاوه بر این، کلیه قوانین و توافقات کاری باید در طی فرآیند در نظر گرفته شوند.

روش‌شناسی پژوهش: بدین منظور در این مقاله، با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی مشخصات، شرایط، قوانین و توافقات کاری در نیروگاه شهید سلیمی نکا به‌عنوان یکی از نیروگاه‌های استراتژیک کشور و از مهم‌ترین سرمایه‌های ملی کشور در مساله گنجانده شده است. مساله زمان‌بندی نیروی‌انسانی در این نیروگاه شامل محدودیت‌های مختلف و درعین‌حال متناقض است. ازاین‌رو، تمرکز این تحقیق بر بررسی مساله زمان‌بندی نیروی‌انسانی بر پایه یک مدل چندهدفه می‌باشد. مدل ریاضی پیشنهادی سه تابع هدف دارد. کمینه نمودن تعداد نیروهایی با سطوح مهارتی بالا به کارهایی با سطح مهارت پایین، کمینه‌سازی دستمزد پرداختی به کارکنان و بهترین استفاده از نیروها. به دلیل ساختار حاکم بر مساله و پیچیدگی آن، مساله در دسته مسایل غیر چندجمله‌ای سخت قرار می‌گیرد دو الگوریتم فرا ابتکاری جست‌وجوی پراکنده[1] و ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب[2] برای حل مدل چندهدفه تعمیم داده شده است. به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی، هفت مساله نمونه با استفاده از الگوریتم‌های تعمیم‌یافته حل شده است.

یافته‌ها: درمجموع، نتایج به‌دست‌آمده از حل مسایل در اندازه‌های مختلف با استفاده نمودارهای شاخص‌های عملکردی و مقایسه بین دو الگوریتم، نشان از بهتر بودن الگوریتم جست‌وجوی پراکنده در دو شاخص کیفی کیفیت و پراکندگی و بهتر عمل کردن الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب در شاخص کمی یکنواختی فضا می‌باشد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: نتایج حاصل از پیاده‌سازی این مدل در نیروگاه‌ها می‌تواند منجر به بهبود کارایی عملیاتی، افزایش بهره‌وری نیروی انسانی و ارتقای کیفیت خدمات شود.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی نیروی‌انسانی، برنامه‌ریزی، مدل چندهدفه.

۱- ادبیات موضوع

برنامه‌ریزی نیروی انسانی از اهمیت به سزایی برخوردار است، چرا که کلیه برنامه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت سازمان‌ها توسط افراد و نیروهای انسانی تشکیل‌دهنده آن پیاده‌سازی و اجرا می‌گردند، اگر سازمان‌ها فاقد یک برنامه‌ریزی صحیح از نیروی انسانی باشند، ممکن است برنامه‌های سازمان به شکست منتهی شوند. برنامه‌ریزی نیروی انسانی مستلزم تجزیه‌وتحلیل مستمر نیازهای منابع انسانی در پرتو اهداف استراتژیک سازمان، نیازهای کارکنان، فرهنگ و فضای مطلوب سازمانی و همچنین تحلیل بازار نیروی کار و محیط‌های قانونی است. برنامه‌ریزی نیروی انسانی، عرضه و تقاضای

[1] Scatter search

[2] Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)

آتی سازمان برای کارکنان را به‌طور منظم پیش‌بینی می‌کند. یکی از اولین کار منتشرشده در حوزه زمان‌بندی نیروی انسانی توسط دانتزیگ [1] انجام شد.

وی با استفاده از تاخیرهای ترافیکی و تئوری احتمال تعداد کیوسک‌های عوارض و به‌تبع آن تعداد اپراتورهای موردنیاز به‌منظور فراهم نمودن یک سطح معین از سرویس در اوقات مختلف از یک روز (متوسط زمان انتظار) پرداخت. این تحقیقات و روش‌های برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نیروی انسانی در حوزه‌های مختلفی از قبیل سیستم‌های حمل‌ونقل، سیستم‌های درمانی و مراقبتی، خدمات اورژانسی، مراکز مخابراتی و بسیاری از سازمان‌های خدماتی مورداستفاده قرار گرفته است. زمان‌بندی پرسنل نیروگاهی که دارای سطوح مختلف تخصص می‌باشند، یکی از مسایل کاربردی و پیچیده در حوزه زمان‌بندی نیروی‌انسانی است که با وجود اهمیت بالای آن در سطوح عملیاتی و مدیریتی تاکنون کم‌تر موردتوجه محققین قرار گرفته است. به‌طور کل منابع انسانی یکی از مهم‌ترین منابع سازمان‌های تولیدی و خدماتی به‌خصوص صنایع نیرو محور همچون صنعت نساجی می‌باشد [2].

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نیروی انسانی یک رویکرد ترتیب‌دهی عناصر در یک الگوی زمانی یا مکانی به‌منظور رسیدن یا نزدیک شدن به اهداف گوناگونی است، به‌طوری‌که محدودیت‌های مرتبط با این عناصر کاملا یا تقریبا برآورده شوند [3]. دسته‌بندی‌های مختلفی برای مسایل زمان‌بندی نیروی انسانی در ادبیات موضوع مساله پیشنهاد شده است. برای مثال، تیین و کامی‌یاما [4] مساله عمومی زمان‌بندی نیروی انسانی را به پنج زیرمساله شامل نیاز به نیروی کار موقت، نیاز به‌کل نیروی کار، تفریح و مرخصی، زمان‌بندی‌های کار و زمان‌بندی‌های شیفت تقسیم نمودند. بیکر [5] نیز مساله زمان‌بندی نیروی انسانی را به سه نوع: زمان‌بندی شیفت (زمان‌بندی اوقات روز)، زمان‌بندی روزهای تعطیل (زمان‌بندی ایام هفته) و زمان‌بندی تور که ترکیبی از دو نوع اول است، تقسیم نمود. دی کاسماکر و همکاران [6] نیز به دسته‌بندی مسایل مختلف زمان‌بندی نیروی انسانی در دنیای واقعی پرداختند. این نوع مسایل، منجر به ارایه مدل‌های مختلف در ادبیات موضوع شده‌اند:

۱. برنامه‌ریزی بر اساس عملکرد بر اساس تعداد کارکنان موردنیاز [7] و [8].
۲. برنامه‌ریزی بر اساس تغییرات تقاضای متغیر [11–9].
۳. برنامه‌ریزی بر اساس پویایی وظایف شامل خدمات حمل‌ونقل [12].
۴. برنامه‌ریزی بر اساس پروژه [13].

برای طبقه‌بندی پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه زمان‌بندی نیروی انسانی، پژوهش‌های با درجه تشابه بالا در دسته‌های کاربردی مربوطه مانند مراکز تلفن، مراکز حمل‌ونقل، امنیتی، بهداشت و سازمان‌های تولیدی دسته‌بندی و در هر بخش به‌صورت مجزا مرور می‌شوند.

۱-۱- مراکز تلفن

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نیروی انسانی در مراکز تلفنی، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خدمه نامیده می‌شود. برنامه‌ریزی کارکنان در مراکز تلفن به ویژگی جغرافیائی بستگی ندارد. این موضوع، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی را کمی ساده‌تر می‌کند. ماهیت و تعداد دقیق کارهایی که باید انجام شوند از پیش مشخص نیستند. تنها مورد مشخص این است که یک الگوی نیاز به نیروی انسانی برای کل افق برنامه‌ریزی وجود دارد. این ویژگی، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی در مراکز تلفن را پیچیده می‌کند. لازم است به این نکته توجه شود که نیاز به نیروی انسانی در کاربردهای مراکز تلفن روز به روز و هفته‌به‌هفته تغییر می‌کند. شرکت *AT&T* با اجرای پژوهش بریگاندی و همکاران [14] هزینه‌هایش را کاهش داد و جایزه ادلمن[1] را در سال ۱۹۹۳ برنده شد. یک مطالعه دیگر بر روی مرکز درخواست صورت‌حساب تلفن در هنگ‌کنگ توسط پارکان و همکاران [15] صورت گرفت.

بوفا و همکاران [16] برای حل مساله موردمطالعه در مراکز تلفن، سه مرحله پیش‌بینی، الزامات نیروی انسانی و زمان‌بندی ادغامی را بررسی کردند و رویکردهای برنامه‌ریزی ریاضی و ابتکاری برای زمان‌بندی شیفت ارایه کردند. هندرسن و همکاران [17] به تعمیم برخی از رویکردهای اخیر در ادغام نمودن شبیه‌سازی تقاضا، برنامه‌ریزی نیروی انسانی موردنیاز و برنامه‌ریزی و زمان‌بندی شیفت پرداختند. ارتگرال و باموکابل [18] یک مدل

---

[1] Edelman

برنامه‌ریزی عدد صحیح برای زمان‌بندی کارکنان در یک مرکز تلفن دوزبانه (عربی و انگلیسی) ارایه نمودند. روش پیشنهادی شامل دو بخش است که ابتدا نیازهای کارکنان را در یک ساعت از یک هفته به دست می‌آورد که از تحلیل اطلاعات، صف تقریبی و مدل شبیه‌سازی استفاده می‌گردد. آورامیدیس و همکاران [19] مساله زمان‌بندی کارکنان در یک مرکز تلفن چندمهارته را در نظر گرفته و یک رویکرد حل که شبیه‌سازی با برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و تولید برش را ترکیب می‌کند، پیشنهاد نمودند.

۲-۱- سیستم‌های حمل‌ونقل

پژوهش‌های انجام‌شده در ارتباط با زمان‌بندی نیروی انسانی سیستم‌های حمل‌ونقل دارای ویژگی‌های مشترک و متفاوتی است که برای مجزا و طبقه‌بندی کردن این پژوهش‌ها از آن استفاده می‌شود. ویژگی‌های مشترک این کاربردها عبارت‌اند از:

۱. ویژگی‌های زمانی و مکانی، یعنی هر کار توسط زمان و مکان شروعش و زمان و مکان پایانش مشخص می‌شود.
۲. کلیه کارهایی که باید توسط کارکنان انجام شوند از یک جدول زمانی معلوم تعیین می‌شوند.

بزرگ‌ترین کاربرد برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نیروی انسانی در حوزه خطوط هوایی است، زیرا تاثیر زمان‌بندی و برنامه‌ریزی مناسب کارکنان از نظر اقتصادی غیرقابل‌چشم‌پوشی است. رایج‌ترین رویکرد برای حل برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خدمه خطوط هوایی، تکنیک معروف تجزیه است. آرابیر و همکاران [20]، اولین پژوهش را در این حوزه انجام دادند.

آندرسن و همکاران [21] تفاوت‌های عمده‌ای را برحسب طبقات خدمه، انواع هواپیما، ساختارهای شبکه، قوانین و مقررات، نظم و قاعده جدول‌های زمانی پرواز و ساختارهای هزینه‌ای مطرح کردند. مرسی‌یر و سومیس [22] یک مدل یکپارچه برای مسیریابی هواپیما، زمان‌بندی خدمه و زمان‌سنجی مجدد پرواز ارایه نموده و ترکیبی از تکنیک تجزیه، تولید ستونی و یک رویه تولید محدودیت پویا را برای حل مساله پیشنهاد کردند. ویدی و همکاران [23] نیز از یک رویکرد تکراری برای حل مساله ادغام‌شده مسیریابی هواپیما و زمان‌بندی خدمه استفاده نمودند. آن‌ها نشان دادند که با زوج کردن دو مساله به‌صورت ابتکارانه، به‌سرعت یک مجموعه حل باکیفیت مناسب تولید می‌شود. دوک و همکاران [24] نیز، کاهش تاخیرهایی که از تغییر خدمه هواپیما ناشی می‌شود را بررسی کردند. بر اساس یک مدل قطعی انتشار تاخیر، یک شاخص برای ثبات برنامه‌ریزی خدمه خطوط هوایی و هواپیما پیشنهاد کردند.

بهینه‌سازی عملیاتی سفرهای دوسره خدمه توسط استاجکویچ و همکاران [25] موردمطالعه قرار گرفت. یک مساله عملیاتی عبارت است از ساخت برنامه‌هایی برای خلبانان و خدمه پرواز ذخیره که برای انجام پروازهایی که خدمه تخصیص‌یافته‌اش قادر به پرواز نیستند و یا پروازهایی که به آن‌ها هیچ خدمه‌ای تخصیص داده نشده است، گوش به‌زنگ و آماده می‌باشند. به‌منظور بهره‌برداری بهتر، در تولید سفرهای دوسره سعی می‌شود که دوره‌های استراحت طولانی حذف‌شده و هزینه و جایگزین‌سازی خدمه حداقل گردد. به‌طورکلی، کسری و یا مازاد خدمه ممکن است تا حدی سودمند باشد، اما کسری و مازاد خدمه به میزان زیاد با افزودن جریمه هایی در اهداف مساله مرتفع می‌گردد [26].

سان و همکاران [27] به زمان‌بندی نیروی انسانی برای انجام عملیات بارگذاری بسته‌های غذایی در هنگام پرواز در سفرهای متعدد پرداخته‌اند. یک تیم بارگذاری با شیفت‌های قابل تغییر برای تحویل و بارگذاری بسته‌های غذایی موردنیاز است. گائو و همکاران [28] برای حل مساله زمان‌بندی خدمه و فرآیند تخصیص در خطوط هوایی از یک روش ابتکاری بر اساس استراتژی‌های انتخاب چندوزنی استفاده نمودند که در آن اعضای خدمه به‌طور غیریکنواخت بین پایگاه‌ها به ماموریت فرستاده می‌شوند. زقال و مینوکس [29] یک رویکرد جدید برای مساله تخصیص خدمه خطوط هوایی که در مسیرهای کوتاه و متوسط پرواز می‌کنند، ارایه نمودند. مسایل زمان‌بندی خدمه در سطح برنامه‌ریزی معمولا در دو گام حل می‌شوند: ۱- ایجاد الگوهای کاری و ۲- تخصیص این الگوها به خدمه انفرادی. اولین گام با استفاده از یک مدل مجموعه پوششی و دومین گام با استفاده از مدل تقسیم‌بندی مجموعه[1] حل می‌شود.

[1] Set-partitioning model

مدارد و ساهنی [30] هر دو مدل را ادغام نموده و شرح دادند که چگونه ساخت سفرهای دوسره و تخصیص سفرهای دوسره در یک گام انجام می‌شود و از روش‌های جست‌وجوی درختی ساده و الگوریتم‌های تولید ستونی و کوتاه‌ترین مسیر برای حل مساله موردنظر بهره گرفتند. سوآی و تگهم [31] مساله سفرهای دوسره خدمه خطوط هوایی و زمان‌بندی خدمه خطوط هوایی را ادغام نموده و از یک رویکرد مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل آن استفاده نمودند. هو و لیونگ [32] مساله زمان‌بندی نیروی انسانی در تامین غذا و سایر ملزومات برای خطوط هوایی را رابطه‌بندی نمودند.

در سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خدمه توجه قابل ملاحظه‌ای را نیز دریافت نموده‌اند. همانند برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خدمه خطوط هوایی، برنامه‌ها و زمان‌بندی‌های اتوبوس‌ها نیز از جدول‌های زمانی معین برای اتوبوس‌ها ساخته می‌شوند. پائولو و همکاران [33] مدلی در زمینه زمان‌بندی هم‌زمان پرسنل و وسایل‌نقلیه در بخش مدیریت زباله‌های شهری ارایه کرده‌اند. مدیریت زباله‌های شهری به یک مشکل پیچیده برای مدیرانی که در این قسمت کار می‌کنند تبدیل شده است. پترز و همکاران [34] روشی جهت تولید زمان‌بندی‌های کم‌هزینه برای رانندگان اتوبوس در یک سیستم حمل‌ونقل درون‌شهری در هند تعمیم داده و عوامل موثر بر بهره‌وری رانندگان و بهره‌برداری از آنان را بررسی نمودند و از ترکیبی از الگوریتم شاخه و هزینه، آزادسازی لاگرانژین و الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه برای حل مساله استفاده کردند. دی-متا و پترز [35] زمان‌بندی‌های کاری برای انواع رانندگان اتوبوس و انواع اتوبوس‌ها در یک سیستم حمل‌ونقل درون‌شهری در هند را تعمیم داده و از ترکیبی از الگوریتم شاخه و هزینه، آزادسازی لاگرانژین و الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه برای حل مساله استفاده کردند.

۳-۱- سیستم‌های سلامت و بهداشت

یکی از مسایل موجود در زمان‌بندی نیروی انسانی، مساله‌ی زمان‌بندی الگوی شیفت پرستاران است. در این مساله، تعداد پرستاران موردنیاز برای پوشش تقاضای هر شیفت در طول دوره‌ای زمان‌بندی مشخص بوده و هدف از حل مساله، تخصیص هر پرستار به مکان شیفت‌ها است، به‌طوری‌که تقاضای هر مکان‌شیفت برآورده شود. درنهایت لیستی از شیفت‌های کاری هر پرستار ارایه می‌شود.

الیاکوب و شرالی [36] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای حل مساله ارایه نمودند. بارد و پورنومو [37] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح ارایه و آن را با روش تولید ستون حل کردند. بلین و دمولمیستر [38] از روش شاخه و قیمت برای حل مساله کمک گرفتند. به دلیل پیچیدگی بیش‌ازحد مساله و زمان حل بالای روش‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح، الگوریتم‌های ابتکاری و اخیرا فرا ابتکاری برای حل مساله به‌کار گرفته شده‌اند. داوزلند و تامپسون [39] از الگوریتم فرا ابتکاری جست‌وجوی ممنوع و آیکلین و داوزلند [40] از الگوریتم ژنتیک برای حل مساله استفاده کردند. در ادامه تحقیقات محققین پیشرفت‌های بیشتری در کاربرد برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و تکنیک‌های بهینه‌سازی شبکه برای تعمیم برنامه‌های پرستاران انجام شد [41].

روش‌های برنامه‌ریزی محدودیت[1] نیز برای مدل کردن قوانین پیچیده مرتبط با برنامه‌های پرستاران مورداستفاده واقع شدند [42]. روش‌های فوق، بر روی مسایل شامل برنامه‌ریزی‌های ادواری و غیرادواری اعمال شدند. ایسکن و هنکک [43] از یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل یک مجموعه بزرگ پوشش‌دهنده رابطه‌بندی برنامه‌ریزی عدد صحیح به‌منظور تعمیم برنامه‌هایی با ترکیبی از نیروی انسانی دایم و موقت با تقاضای مشخص در بازه‌های زمانی نیم‌ساعته در طی یک دوره ده روزه استفاده نمودند. نوری افشار [44] یک روش شبیه‌سازی تکمیل‌شده توسط روش‌های هوش مصنوعی[2] برای جای دادن آموزش پرستاران در برنامه‌ها ارایه نمود. لوکمن و همکاران [45]، تعمیم یک سیستم مبتنی بر دانش[3] برای تولید برنامه‌های هفتگی پرستاران و تنظیم برنامه‌ها در واکنش به‌تغییرات روزانه تقاضا و در دسترس بودن نیروی انسانی را موردبحث قرار دارند.

داوزلند و تامپسون [39] با استفاده از ترکیب جست‌وجوی ممنوعه و برنامه‌ریزی عدد صحیح به تولید برنامه‌های هفتگی پرداختند که یک مجموعه پیچیده از قوانین شیفتی، محدودیت هزینه‌ای، رتبه پرستاران و محدودیت‌های ترجیحی کارکنان را برآورده می‌کند. برکه و همکاران [46] از یک الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه ترکیبی برای به دست آوردن جواب‌هایی در یک چارچوب زمانی معقول برای یک سیستم تجاری برنامه‌ریزی پرستاران بهره گرفتند. پس از آن، رویکرد پیشنهادی توسط برکه و همکاران [47] با استفاده از یک مجموعه از الگوریتم‌های ممتیک[4] اصلاح شد.

---

[1] Constraint Programming (CP)
[2] Artificial Intelligence (AI)
[3] Knowledge-based system
[4] Memetic algorithms

آیکلین و داوزلند [40] مساله زمان‌بندی پرستاران در یک بیمارستان در انگلیس را مدنظر قرار داده و برای حل آن از یک رویکرد الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. بلانتی و همکاران [48] یک رویکرد جست‌وجوی همسایگی و رویه آزمند را به‌منظور ممانعت از تولید جواب‌های غیرعملی برای مساله زمان‌بندی پرستاران معرفی نموده و از رویه جست‌وجوی ممنوعه و جست‌وجوی محلی[1] تکراری برای حل مساله استفاده نمودند. گاجهر و رونر [49] از الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان[2] برای حل یک مساله پویای زمان‌بندی پرستاران در بیمارستانی در اتریش استفاده نمودند. برکه و همکاران [50] یک مدل چندهدفه که ترکیبی از برنامه‌ریزی عدد صحیح و جست‌وجوی همسایگی متغیر را برای مسایل برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پرستاران در محیط‌های بیمارستانی مدرن با محدودیت‌های زیاد استفاده می‌کند، ارایه نمودند. گلاس و نایت [51] بر مساله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پرستاران تمرکز نموده و چهار مساله نمونه برگرفته از ادبیات برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پرستاران را به‌منظور فراهم نمودن نگرشی به ماهیت مساله مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. تپل اگلو و سلیم [52] با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مقادیر هدف ترجیحات پرستاران و مدیریت بیمارستان، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح چندهدفه جدید برای مساله زمان‌بندی پرستاران ارایه نموده و با استفاده از رویکردهای حل فازی مختلف، مدل ارایه شده را به سه مدل برنامه‌ریزی آرمانی فازی تبدیل نمودند.

برتلز و فاهله [53] مساله مراقبت در منزل را در نظر گرفته و اجزای بهینه‌سازی هسته‌ای نرم‌افزار *PARPAP* را موردبررسی قراردادند. اوبرن و همکاران [54] مساله مراقبت در منزل را مدنظر قرار داده و یک سیستم پشتیبانی تصمیم *LAPS CARE* را برای کمک به برنامه‌ریزان تعمیم دادند. آکجیراتیکارل و همکاران [55] از یک الگوریتم مبتنی بر بهینه‌سازی ذرات انبوه برای زمان‌بندی نیروهای انسانی مراقبت‌کننده در منزل در انگلیس بهره گرفتند. در این مساله، هر حل نشان‌دهنده فعالیت‌های مراقبت مربوطه و اولویت تخصیص می‌باشد. چیین و همکاران [56] یک الگوریتم تکاملی بر اساس الگوریتم ژنتیک را برای حل مساله زمان‌بندی بیماران توان‌بخشی به‌منظور افزایش کیفیت خدمات به‌وسیله کاهش زمان انتظار بیماران، بهبود کارایی عملیات و افزایش بهره‌برداری از تجهیزات درمانی گسترش دادند. تپل اگلو [57] یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی شامل محدودیت‌های سخت و نرم برای زمان‌بندی رزیدنت‌ها در بخش اورژانس طی یک افق برنامه‌ریزی ماهانه ارایه و از سیاست‌های مدیریت عملیاتی جهت تامین نیروی‌انسانی بخش تعمیرات و نگهداری استفاده کرد. تپل اگلو [58] یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه برای رزیدنت‌ها در سطوح مختلف ارشدیت ارایه نمود و با استفاده از روش ترتیبی و وزن‌دهی به حل آن پرداخت. یانگ و همکاران [59] از داده‌کاوی، طبقه‌بندی و یک درخت تصمیم برای تحلیل مدل پیش‌بینی تقاضای بیماران و زمان‌بندی پزشکان در بخش اورژانس استفاده نمودند. بلیین و همکاران [60] نیز، یک سیستم پشتیبانی تصمیم برای مساله چندهدفه زمان‌بندی ادواری جراحان پیشنهاد نموده و برای حل آن از تکنیک‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و الگوریتم فرا ابتکاری شبیه‌سازی تبرید استفاده نمودند.

۴-۱- خدمات حفاظتی و اورژانسی

پیشرفت در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی منابع انسانی در بخش بهداشت و درمان با چالش‌های بیشتری همراه است. با توجه به اهمیت زمان‌بندی نیروی انسانی و مطرح‌شدن انسان به‌عنوان محور توسعه که نمود بارز آن را می‌توان در برنامه توسعه هزاره سازمان ملل دید، مدیریت منابع انسانی در این بخش از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود. اولین پژوهش در این زمینه در سال ۱۹۷۹ توسط باتلر و میدل [61] انجام شد که در آن مساله تعیین الگوهای ادواری از شیفت‌های صبح، ظهر و شب با دو روز استراحت متوالی را در مورد برنامه‌ریزی پلیس نظر می‌گیرد. تمرکز سینوآنی و همکاران [62] بر مساله تعمیم برنامه‌ها برای گاردهای امنیتی بود. مساله به‌صورت یک برنامه عدد صحیح چندهدفه رابطه‌بندی شده است. اهداف مختلف مساله شامل حداقل نمودن کسری پوشش تقاضا و ارضای ترجیحات کارکنان می‌باشد. مطالعه انجام‌شده توسط تیلور و هاکسلی [63]، مساله تخصیص شیفت‌های ماموران پلیس را با هدف حداقل نمودن کسری پوشش تقاضا در نظر گرفته است. ارنست و همکاران [64] برنامه‌ریزی ماموران آمبولانس جهت برآورده نمودن تقاضا برای ماموران در دسته‌بندی‌های مختلف که باید در شیفت‌های مشخص سرکار باشند را در نظر گرفتند. راجاگوپالان و صیدام [65] بر روی حداقل‌سازی مدت‌زمان پاسخگویی تمرکز نمودند.

۵-۱- خدمات و مطلوبیت‌های شهری

دولت‌ها در هر سطحی اعم از: محلی، ایالتی و ملی برای ارایه خدمات به تعداد زیادی نیروی انسانی نیاز دارند. برنامه‌ریزی بهینه نیروی انسانی برای این خدمات عمومی، فرصت چشمگیری را برای بهبود خدمات دولتی همراه با کاهش هزینه‌ها فراهم می‌آورد. مطالعه انجام‌شده توسط ویکتور

---

[1] Local Search (LS)

[2] Ant Colony Optimization (ACO)

فرناندز و همکاران [66] منجر به ارایه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای مساله زمان‌بندی هم‌زمان وظایف نیروی انسانی و سپس تخصیص آن‌ها به این وظایف بر اساس مهارتشان شد. آن‌ها با در نظر گرفتن این‌که یک کار می‌تواند تنها توسط کارکنانی بامهارت خاص انجام شود را نشان دادند. یک مطالعه موردی انجام‌شده توسط مولد [67] به بررسی پردازش انواع ادعا که ممکن است در آژانس‌های دولتی که با دعاوی حقوق بازنشستگی و سایر مستمری‌های تامین اجتماعی سر و کار دارند یا در شرکت‌های خصوصی که به دعاوی بیمه می‌پردازند رخ دهد، پرداخت. ریتزمن و همکاران [68] یک طبقه‌بندی از مشکلات جداسازی برای سازمان‌های تولیدی و خدماتی توسعه دادند و زمان‌بندی‌های هفتگی برای یک مرکز پردازش پستی به دست آوردند.

۶-۱- تولید

زمان‌بندی نیروی‌انسانی برای کارخانه‌ها و شرکت‌های تولیدی از اهمیت خاصی برخوردار است، زیرا مدیران در این نوع شرکت‌ها تمایل دارند از حداقل نیروی انسانی حداکثر استفاده را ببرند. مارتا و همکاران [69] الگوریتمی برای مساله زمان‌بندی نیروی‌انسانی در کارخانه تولید شیشه ارایه کردند. آن‌ها از یک الگوریتم ابتکاری برای حل مساله استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده در مقایسه با یک مدل بهینه‌سازی نشان دادند که الگوریتم پیشنهادی عملکرد خوبی را داشته است. حسنی و همکاران [70] به ارایه یک مدل زمان‌بندی تک‌هدفه در رابطه با زمان‌های استراحت برای کارگران یک کارخانه در طول یک شیفت پرداختند. شاه نظری و همکاران [71] به حل مساله زمان‌بندی نیروی‌انسانی در یک کارخانه تولید لوله‌های پلی اتیلن با استفاده از یک مدل دوهدفه پرداختند. ساوینی و همکاران [72] به ارایه مدلی پویا برای زمان‌بندی نیروی‌انسانی در یک خط‌مونتاژ چند عامله پرداختند. هدف آن‌ها این بود که تعداد کارگران کم‌تر از دستگاه‌های مونتاژ باشد.

در انتهای مطالعه ادبیات در این قسمت به مروری بر چند مقاله که در زمینه مساله زمان‌بندی نیروی انسانی در نیروگاه‌ها و شبکه‌های برقی صورت گرفته است، پرداخته خواهد شد. البته باید متذکر شد که تحقیقات محدودی در این بخش انجام‌شده است. لیلی و همکاران [73] مساله زمان‌بندی نیروی‌انسانی جهت نگهداری و تعمیرات در نیروگاه برقی در نیجریه را با در نظرگیری نیروهای ستادی چند حالته موردبررسی قرار دادند. آن‌ها به بررسی انجام برنامه نگهداری و تعمیرات در ۴ روز کاری به‌جای برنامه‌های ۵ روزه قبلی پرداختند. یار و ونایاگامورتی [74] زمان‌بندی بهینه نگهداری و تعمیرات ژنراتورهای نیروگاهی را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه و با در نظرگیری زمان‌بندی نیروی‌انسانی درگیر در بخش نگهداری و تعمیرات ارایه دادند. همچنین، ایتزن [75] از یک رویکرد تولید ستونی جهت تهیه برنامه‌های کاری برای حدود ۵۰ نفر نیروی کار در یک عملیات تولید نیروی برق بهره گرفت.

با توجه به این‌که این مسایل از مجموعه مسایل *NP-Hard* هستند، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده‌اند. لذا، الگوریتم‌های بسیاری برای حل آن‌ها ارایه شده است. الگوریتم‌های ارایه شده به دو دسته الگوریتم‌های دقیق و تقریبی تقسیم می‌شوند. روش دقیق به روش‌هایی اطلاق می‌شود که فقط به دنبال جواب بهینه کلی هستند و جواب‌های دیگری را نتیجه نمی‌دهند. با توجه به این‌که مساله زمان‌بندی نیروی انسانی یک مساله *NP-Hard* است، حتی برای ابعاد نه چندان بزرگ مساله، روش‌های دقیق به‌سرعت کارایی خود را از دست می‌دهند به‌طوری‌که بهترین الگوریتم‌های دقیق تنها قادر به حل مسایل با ابعاد بسیار کوچک می‌باشند [76]. با این وجود این روش‌ها، در مورد مسایل با ابعاد کوچک منجر به یافتن بهینه کلی مساله می‌شوند. از میان روش‌های حل بهینه دقیق ارایه شده برای زمان‌بندی پروژه می‌توان به «برنامه‌ریزی ریاضی» اشاره‌کرده که به‌عنوان مثال در [77]، [78] به کار گرفته شده است. از دیگر روش‌های دقیق می‌توان به روش‌های شمارش ضمنی ازجمله برنامه‌ریزی پویا [79]، [80] و روش‌های شاخه و کران [81]، [82] اشاره کرد. روش‌های فرا ابتکاری و برنامه‌ریزی محدودیت از مجموعه روش‌های حلی هستند که در ادبیات موضوع موردبررسی قرار گرفته‌اند. خصوصیت مشترک این روش‌ها عدم توانایی این روش‌ها در اثبات بهینگی راه‌حل‌های ارایه شده می‌باشد. امروزه، رویکردهای فراابتکاری کاربردهای بسیاری در شاخه‌های مختلف بهینه‌سازی یافته‌اند. نمونه‌هایی از این روش‌ها عبارت‌اند از: الگوریتم‌های جست‌وجوی ممنوع [83]، [84] کلونی مورچگان [85]، [86] الگوریتم شبیه‌سازی تبرید [87]، [88] الگوریتم‌های ژنتیک [89]، [90] الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه[1] [83]، [91] و...

[1] Partial swarm optimization

۲- رابطه‌بندی مساله زمان‌بندی نیروی انسانی چند مهارته چندهدفه در نیروگاه شهید سلیمی نکا

نیروگاه شهید سلیمی نکا به‌عنوان یکی از نیروگاه‌های استراتژیک کشور و از مهم‌ترین سرمایه‌های ملی کشور محسوب می‌گردد. این نیروگاه از بزرگ‌ترین نیروگاه‌های خاورمیانه به شمار می‌رود که در ساحل دریای خزر و در ۲۲ کیلومتری شمال شهرستان نکا واقع در استان همیشه سرسبز مازندران قرار دارد. این نیروگاه دارای ۴ واحد ۴۴۰ مگاواتی بخار و یک بلوک سیکل ترکیبی متشکل از ۲ واحد ۱۳۶ مگاواتی گازی و یک واحد ۱۶۰ مگاواتی بخار و دو واحد توربین انبساطی به قدرت ۹/۴ مگاوات می‌باشد و در آینده نه چندان دور در بخش طرح و توسعه، زیرمجموعه‌های تولیدی دیگری با توجه به رشد مصرف برق در کشور نیز به این مجموعه اضافه خواهند گشت.

برای مساله موردبحث، واحد بهره‌برداری شماره ۱ نیروگاه در نظر گرفته شده است. واحد بهره‌برداری شماره ۱ نیروگاه دارای سه شیفت کاری هشت‌ساعته می‌باشد که پنج گروه کاری ثابت به هریک از این شیفت‌ها در طول روز تخصیص داده می‌شوند. به این صورت که نیروهای یک گروه خاص بعد از کار در شیفت خاصی در چهار شیفت بعدی استراحت دارند و در شیفت پنجم دوباره مشغول کار می‌شوند و این روند تکراری ادامه دارد. نیروها در گروه‌های خود ثابت هستند و نمی‌توانند به گروه‌های دیگر انتقال یابند. فقط برای مرخصی‌ها می‌توانند با هماهنگی یکدیگر شیفت‌های خود را جابه‌جا کنند. با این مدل نیروها ۱۳۶ ساعت در ۲۸ روز کار می‌کنند که ازنظر قانون کار و استانداردهای جهانی اصلا بهینه به نظر نمی‌رسد. به دلیل دولتی بودن نیروگاه و همچنین استخدام دایم بودن نیروها نمی‌شود نیروها را تعدیل کرد، اما با روند خصوصی‌سازی نیروگاه و همچنین توسعه نیروگاه ما توانستیم با ارایه مدلی چندهدفه به شیفت‌بندی نیروها اقدام کرده و همان کاری که در این واحد با ۱۸۷ نیروی‌انسانی در حال انجام است را با تعداد خیلی کم‌تری به انجام برسانیم که در فصل بعد مساله مذکور حل می‌گردد. نحوه شیفت‌بندی کنونی نیروگاه در **جدول ۱** نشان داده شده است.

جدول ۱- نحوه شیفت بندی نیروها به‌صورت دستی.
Table 1- How to manually shift forces.

شیفت روز	شیفت صبح	شیفت عصر	شیفت شب
1	A	B	C
2	D	E	A
3	B	C	D
4	E	A	B
5	C	D	E

مساله زمان‌بندی نیروی انسانی چندهدفه مدنظر که بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از نیروگاه شهید سلیمی نکا رابطه‌بندی شده، در سایر محیط‌های تولیدی و خدماتی مشابه که به‌صورت ۲۴ ساعته در چندین شیفت کار می‌کنند، با اندکی تغییرات قابل کاربرد می‌باشد. ما با استفاده از اطلاعات موجود برای واحد بهره‌برداری شماره یک نیروگاه اقدام به نوشتن مدل ریاضی چندهدفه نمودیم که قابل‌تعمیم به‌کلیه واحدهای بهره‌برداری نیروگاه نیز می‌باشد. این مدل با استفاده از فرضیات واقعی نیروگاه و همچنین خواسته‌های مدیران نیروگاه ازجمله کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری نیروها و همچنین استفاده از نیروها متناسب با تخصص و مهارتشان رابطه‌بندی شده است.

۲-۱- فرض‌های مساله

مساله پیش‌رو یک مطالعه موردی در بخش بهره‌برداری نیروگاه شهید سلیمی نکا در حوزه زمان‌بندی نیروهای انسانی این نیروگاه می‌باشد. از این رو، موارد زیر به‌عنوان فرض‌های تحقیق در کل پروژه در نظر گرفته شده است.

۱. یک روز کاری به ۳ شیفت ۸ ساعته تقسیم می‌شود.
۲. افق برنامه‌ریزی ۲۸ روزه می‌باشد.
۳. کارکنان به ۳ گروه تخصصی تقسیم می‌شوند و در هر گروه تخصصی در دو سطح مهارت قرار می‌گیرند.
۴. نیروی دارای سطح مهارت کارشناس از یک تخصص می‌تواند کار یک تکنسین از همان تخصص را انجام دهد، اما یک تکنسین نمی‌تواند به‌جای کارشناس فعالیت انجام دهد.

۵. کارکنان مجاز به کار در یک شیفت از هر روز می‌باشند.
۶. هر نیروی کاری که در شیفت شب‌کار می‌کند روز بعد باید تعطیل باشد.
۷. کارکنانی که در شیفت شب‌کار کرده‌اند و روز بعد را استراحت نموده‌اند، در صورت تخصیص به کار در دو روز پس از روز استراحت، مجاز به کار در شیفت شب نیستند.
۸. یک نیروی کار می‌تواند حداکثر ۲ روز متوالی که به کار مشغول است به یک شیفت ثابت تخصیص داده شود.
۹. هر نیروی کار در هر هفته حداقل باید به یک شیفت صبح، عصر و شب تخصیص داده شود.
۱۰. حداقل و حداکثر ساعات کاری کارکنان در طی دوره برنامه‌ریزی از قبل مشخص است.
۱۱. فاصله بین شیفت‌هایی که به هر نیروی کار تخصیص داده می‌شود باید حداقل ۲ شیفت باشد.

۲-۲- نمادگذاری

نمادهای زیر، در مدل ریاضی ارایه شده برای مساله زمان‌بندی نیروی انسانی چندمهارته چندهدفه نیروگاه شهید سلیمی استفاده خواهند شد. در ابتدا به تعریف مجموعه‌های استفاده شده در این مدل پرداخته خواهد شد. سپس اندیس‌های مورداستفاده شرح داده می‌شوند و در آخر نیز، به تعریف پارامترها و تعریف متغیر تصمیم مساله پرداخته خواهد شد.

مجموعه‌ها

M	مجموعه کارکنان.
D	مجموعه روزها.
H	مجموعه شیفت‌ها.
S	مجموعه تخصص‌ها.
L	مجموعه مهارت‌ها.
LD	مجموعه آخرین روزها از کلیه هفته ها در افق برنامه‌ریزی.

شمارنده‌ها

m	شمارنده کارکنان ($m=1,......,M$).
d	شمارنده روزها ($d = 1,....,28$).
h	شمارنده شیفت‌ها (صبح = $h1$، عصر = $h2$ و شب = $h3$).
s	شمارنده تخصص‌ها، در این مساله ۳ تخصص مکانیک، برق و الکترونیک داریم ($s1,s2,s3$).
l	شمارنده سطوح مهارت در هر تخصص (تکنسین= $l1$ و کارشناس= $l2$).
ld	شمارنده آخرین روز از هر هفته در افق برنامه‌ریزی (ld=(7,14,21,28.

پارامترها

t_h	طول هر شیفت (ساعت).
T_{min}	حداقل ساعات کاری موردنیاز برای هر نیروی کار در طی دوره زمان‌بندی.
T_{max}	حداکثر ساعات کاری مجاز برای هر نیروی کار در طی دوره برنامه‌ریزی.
C	ضریب جریمه‌ای (هزینه) که نیروگاه برای تخصیص هر نیروی کار به سطح مهارت پایین‌تر از سطح مهارت واقعی‌اش باید متقبل شود.
N_{dhsl}	تعداد کل کارکنان موردنیاز از سطح مهارت ۱ از تخصص s در شیفت h از روز d .
r_{msl}	نیروی کار m با تخصص s می‌تواند به کار کردن در سطح مهارت واقعی‌اش و یا سطح مهارت پایین‌تر تخصیص داده شود که ۱، در غیر این صورت ۰.
V_{ms}	میزان مهارت واقعی هر نیروی کار از تخصص s ، در این مساله (کارشناس V_{ms}=2، تکنسین V_{ms}=1).

C_{mh}	میزان دستمزد نیروی m در شیفت h.
P_m	مطلوبیت استفاده از نیروی m توسط نیروگاه که به سوابق نیروی کار در ماه‌های گذشته، مدرک تحصیلی و دوره‌های گذرانده‌شده توسط هر نیروی کار برمی‌گردد و در شروع هر بازه برنامه‌ریزی توسط واحد منابع انسانی تعیین می‌شود.

متغیر تصمیم

X_{mdhsl}	اگر نیروی کار m از تخصص s بامهارت l در روز d به شیفت h تخصیص داده شود که ۱، در غیر این صورت ۰.

۳-۲- مدل پیشنهادی

مساله زمان‌بندی نیروی انسانی در این نیروگاه شامل محدودیت‌های مختلف و در عین‌حال متناقض است. درحقیقت، در این مساله می‌بایست علاوه بر در نظر گرفتن قوانین کاری و محدودیت‌های مختلف قانونی مربوط به شیفت‌بندی کارکنان در محیط‌های تولیدی و خدماتی، انتظارات کارکنان و مدیران به‌صورت هم‌زمان موردبررسی قرار گیرد. لذا در این بخش ابتدا مدل تعمیم‌یافته نمایش داده شده و در قسمت‌های بعدی به شرح توابع هدف و محدودیت‌های مساله پرداخته خواهد شد.

$$MinZ1:\sum_{m}\sum_{d}\sum_{h}\sum_{s}C(V_{m.s}.X_{mdhs,lt}-X_{mdhs,lt}). \tag{۱}$$

$$MinZ2:\sum_{m}\sum_{d}\sum_{h}\sum_{s}\sum_{l}C_{mh}.X_{mdhsl}. \tag{۲}$$

$$MinZ3:\sum_{m}\sum_{d}\sum_{h}\sum_{s}\sum_{l}P_{m}.X_{mdhsl}. \tag{۳}$$

s.t.

$$\sum_{h}\sum_{s}\sum_{l}X_{mdhsl}\le 1; \qquad for\ all\ m,d. \tag{۴}$$

$$T_{min}\le\sum_{d}\sum_{h}\sum_{s}\sum_{l}X_{mdhsl}.t_{h}\le T_{max}; \qquad for\ all\ m. \tag{۵}$$

$$\sum_{m}X_{mdhsl}=N_{dhsl}; \qquad for\ all\ d,h,s,l. \tag{۶}$$

$$X_{mdhsl}\le r_{msl}; \qquad for\ all\ m,d,h,s,l. \tag{۷}$$

$$\sum_{s}\sum_{h}\sum_{l}X_{m,d+1,hsl}\le(1-\sum_{s}\sum_{l}X_{md,h3,sl}) \quad; \quad for\ all\ m,d\in\{1,...,D-1\}. \tag{۸}$$

$$\sum_{s}\sum_{l}\sum_{d=7d_1-6}^{7d_1}X_{mdhsl}\ge 1; \quad for\ all\ m,d_1\in\{1,...,|LD|\},h. \tag{۹}$$

$$\sum_{s}\sum_{l}X_{md,h3,l}+\sum_{s}\sum_{l}X_{m,d+2,h3,l}+\sum_{s}\sum_{l}X_{m,d+3,h3,l}\le 1\ \ for\ all\ m,d\in\{1,...,7|LD|-2\}. \tag{۱۰}$$

$$\sum_{s}\sum_{l}(X_{mdhsl}+X_{m,d+1,hsl}+X_{m,d+2,hsl})\le 2 \quad; \quad for\ all\ m,d\in\{1,...,7|LD|-2\},h-\{h3\}. \tag{۱۱}$$

$$\sum_{s}\sum_{1}X_{m,d,h21}+\sum_{s}\sum_{1}X_{md+1,h1,1}\le 1 \quad ;for\ m,d\in\{1,...7|LD|-1\}. \tag{۱۲}$$

$$X_{mdhsl}=\{0,1\}. \tag{۱۳}$$

معادله (۱) تابع هدف اول است که به مینیم کردن تعداد نیروهای بامهارت کارشناس که به کار در مهارت تکنسین تخصیص می‌یابند می‌پردازد. **معادله (۲)** تابع هدف دوم در پی مینیمم کردن دستمزد کارکنان است و **معادله (۳)** تابع هدف سوم است که در تلاش است تا بهترین استفاده را از نیروها داشته باشد. **معادله (۴)** این محدودیت تضمین می‌کند که هر نیروی انسانی در یک روز فقط می‌تواند به یک شیفت تخصیص یابد. **معادله (۵)** تضمین می‌کند که هر نیروی کار فقط در محدوده ساعات کاری مشخص‌شده می‌تواند به شیفت‌ها تخصیص یابد. این محدودیت همچنین موجب می‌شود که بین نیروها فاصله زیادی ازنظر تعداد ساعت کاری ایجاد نشود تا باعث ایجاد اختلاف بین نیروها نشود. **معادله (۶)** تضمین می‌کند که در هر شیفت از هر روز تعداد کارکنانی که بامهارت مشخص از هر تخصص موردنیاز هستند، دقیقا تخصیص یابند. **معادله (۷)** اجازه می‌دهد که نیروهای بامهارت کارشناس به‌جای نیروهای بامهارت تکنسین از تخصص خودشان در صورت نیاز به شیفت‌ها تخصیص یابند. در **معادله (۸)** با تخصیص نیرو به شیفت شب، کل تخصیص به نیروی مذکور برای روز بعد صفر در نظر گرفته می‌شود. **معادله (۹)** تضمین می‌کند که

هر نیروی انسانی در هر هفته حداقل باید به یک شیفت صبح، عصر و شب تخصیص یابد. **معادله (۱۰)** بدین گونه عمل می‌کند که نیرویی که در شیفت شب روز جاری کار کرده است با توجه به فرضیات قبلی فردا استراحت دارد. همچنین، در ۲ روز بعدی پس از روز استراحت نباید به شیفت شب تخصیص یابد. **معادله (۱۱)** به افراد اجازه می‌دهد که هر نیروی کار بتواند حداکثر در دو روز متوالی به شیفت صبح یا عصر تخصیص یابد. **معادله (۱۲)** این فرض را پوشش می‌دهد که فاصله بین دو شیفت کاری هر نیروی کار باید حداقل ۲ شیفت باشد. با توجه به این‌که اگر کسی در شیفت صبح مشغول به کار باشد دیگر نمی‌تواند در آن روز به شیفت تخصیص یابد این فرض برای شیفت صبح برقرار است، همچنین برای کسی که به شیفت شب تخصیص می‌یابد روز بعد استراحت خواهد داشت خودبه‌خود این فرض برقرار می‌شود و تنها برای نیروی که به شیفت عصر روزی مشغول به کار است این محدودیت نوشته شده است تا در فردای آن روز نتواند به شیفت صبح تخصیص یابد و درنهایت **معادله (۱۳)** متغیر تصمیم مساله را معرفی کرده است.

۳- روش حل

در این مقاله از دو الگوریتم برای حل مدل پیشنهادی استفاده شده است.

۱-۳- الگوریتم جست‌وجوی پراکنده

یکی از الگوریتم‌های استفاده شده در این مقاله روش جست‌وجوی پراکنده، به‌عنوان یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر جمعیت است که توسط گلاور [92] ، [93] برای حل گونه خاصی از مسایل به نام مساله محدودیت جانشین مطرح گردید. اساس این روش فرا ابتکاری، بر پایه جست‌وجوی فضای جواب مساله از طریق یک روش هوشمند است. شبه کد این الگوریتم مطابق **شکل ۱** می‌باشد که جزییات آن در ادامه برای حل مساله تعریف‌شده تشریح شده است.


{مرحله۱:
مقداردهی اولیه
مقداردهی اولیه پارامترهای جستجو
تعیین نقطه ایده آل پویای تقریبی.
تولید N حل اولیه با روش جستجوی ممنوعه نخبه‌گرا (ETS[1]).
مرحله۲:
مقداردهی اولیه تطبیقی مجموعه آرشیو پارتو به طوری که آن خالی است.
اعمال رویه تولید جواب‌های پراکنده بر روی جواب‌های موجود جهت تولید جواب‌های پراکنده.
مرحله۳:
اعمال رویه بهبود بر روی جواب‌های تولید شده مرحله قبل. .
مرحله۴:
استفاده از روش به روز رسانی مجموعه مرجع برای ساخت یک مجموعه مرجع شامل حل‌های با کیفیت بالا b1 و راه‌حل‌های متنوع b2 .
مرحله۵:
در حالی که توقف معیار رعایت نشده، انجام بده:
ایجاد زیر مجموعه از مجموعه مرجع توسط روش تولید زیر مجموعه.
برای هر زیر مجموعه با استفاده از روش ترکیبی حل ،جهت تولید حل‌های ترکیبی مجموعهC(X).
برای هر یک از حل‌ها در C(X) اعمال روش بهبود، برای به دست آوردن حل افزایش یافته .
اگر کیفیت حل افزایش یافته بهتر از بدترین عنصر در مجموعه مرجع باشد یا تنوع آن از حداقل عناصر گوناگون در مجموعه مرجع بیشتر است، جایگزین حل‌های مجموعه مرجع شود و مجموعه عنصر جدید=۱.
اگر عنصر جدید وجود نداشت، ساخت جمعیت جدید و استفاده از ژنراتور تنوع، روش بهبود و روش بروز رسانی مجموعه مرجع برای بازسازی مجموعه مرجع.
پایان درحالی که.}

شکل ۱- نمای کلی روش جست‌وجوی پراکنده برای مساله موردبحث.

Figure 1- Overview of the distributed search method for the problem under discussion.

[1] Elite tabu search

نحوه نمایش جواب‌ها

در تمام الگوریتم‌های فرا ابتکاری، به دلیل نیاز به حل‌شدنی در شروع کار، لازم است حل‌شدنی را بر طبق ساختار مشخصی ذخیره کنیم که به این ساختار، نحوه نمایش جواب می‌گویند. یک حل‌شدنی برای مساله موردنظر مطابق **جدول ۲**، به‌صورت یک ماتریس دوبعدی می‌باشد که سطرهای ماتریس برابر با تعداد کارکنان بوده و ستون‌های آن برابر با حاصل‌ضرب تعداد روزهای دوره برنامه‌ریزی و تعداد شیفت در هر روز می‌باشد. به‌طور مثال، برای یک نمونه با ۴۰ نیروی انسانی و ۳ تخصص با ۲ سطح مهارت، ماتریس دوبعدی با تعداد ۴۰ سطر و ۸۴ ستون تشکیل می‌شود که سطرها نشان‌دهنده تعداد نیروی انسانی و ستون‌ها برابر با حاصل‌ضرب تعداد روزها در شیفت‌های هر روز می‌باشد. در **جدول ۲** قسمتی از ماتریس جواب برای توضیح آورده شده است.

جدول ۲- نحوه خروجی جواب در الگوریتم جست‌وجوی پراکنده در نرم‌افزار مطلب.

Table 2- How the answer is output in the sparse search algorithm in MATLAB software.

Day	**d1**			**d2**			**d3**		
Manpower-shift	m	a	n	m	a	n	M	a	n
1.k1	0	2	0	0	2	0	0	0	0
2.k2	0	1	0	0	0	2	0	0	0
3.T	1	0	0	1	0	0	0	1	0

برای مثال با توجه به **جدول ۱** تا **جدول ۳** اگر سطر اول و دوم مربوط به نیروی بامهارت کارشناس و سطر سوم مربوط به نیروی بامهارت تکنسین باشد، بدین‌صورت می‌تواند شرح داده شود که نیروی شماره یک در روز اول به شیفت عصر بامهارت کارشناس تخصیص‌یافته و در روز دوم نیز به شیفت عصر بامهارت کارشناس تخصیص‌یافته و در روز سوم به هیچ شیفتی تخصیص داده نشده است. نفر دوم در روز اول به شیفت عصر بامهارت پایین‌تر یعنی تکنسین تخصیص داده شده و در روز دوم بامهارت کارشناس به شیفت شب و در روز سوم به استراحت خورده است، اما نیروی شماره ۳ در روز اول به شیفت صبح بامهارت تکنسین تخصیص داده شده است. در روز دوم نیز به شیفت صبح بامهارت تکنسین تخصیص داده شده است و در روز سوم به شیفت عصر با مهارت تکنسین تخصیص داده شده است.

نحوه تولید جواب‌های اولیه

نحوه عملکرد این روش به‌صورت زیر است:

۱- برای هر روز i، شیفت اول برای هر تخصص و هر مهارت به‌اندازه تقاضا، از بین کارکنانی که می‌توانند کار کنند، به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند. برای زمان‌بندی بقیه روزها و شیفت‌ها به‌جز شیفت اول روز iام، به‌صورت زیر عمل می‌شود:

- برای هر تخصص و هر مهارت تا برآورده شدن میزان تقاضا، از بین کارمندانی که که می‌توانند ازنظر شدنی بودن در این روز کار کنند، کارمندی که تابه‌حال کم‌تر تخصیص داده شده است، انتخاب و تخصیص داده می‌شود.
- در ضمن به هنگام انتخاب یک کارمند برای یک مهارت بررسی از کارمندانی شروع می‌شود که سطح مهارتشان به سطح مهارت موردبررسی نزدیک‌تر باشد.

۲- به i یک واحد اضافه‌شده و به قدم یک می‌رویم.

آرشیو جواب‌های پارتو

از آن‌جا که در حل مسایل چندهدفه به دلیل وجود تناقض بین اهداف، یک جواب واحد که همه اهداف در آن بهینه باشند وجود ندارد، درنهایت مجموعه‌ای از جواب‌های غالب به‌عنوان جواب‌های بهینه (نزدیک بهینه) ارایه خواهند شد. در این‌جا که از یک روش مبتنی بر آرشیو پارتو برای حل استفاده شده است، کیفیت جواب‌های موجود در آرشیو، بسیار اهمیت دارد. لذا در این پایان‌نامه، این آرشیو در هر تکرار الگوریتم جست‌وجوی

پراکنده به‌روز خواهد شد. جهت به‌روز رسانی آرشیو پارتو، کلیه جواب‌های موجود در آرشیو پارتو و جواب‌های تولیدشده جدید، در یک استخر جواب ریخته شده و سطح‌بندی می‌گردند. سپس کلیه جواب‌های سطح اول به‌عنوان جواب‌های آرشیو پارتوی جدید انتخاب می‌گردند.

روش تولید جواب‌های پراکنده

در این پایان‌نامه، برای تولید جواب‌های پراکنده از روش خطدار کردن مسیر استفاده می‌گردد. این روش در ابتدا به‌منظور هماهنگ‌سازی استراتژی‌های تشدید و تنوع در روش جست‌وجو ممنوع به‌کار برده شده است. این روش، جواب‌های جدید را با استفاده از کاوش مسیرهای متصل‌کننده بین دو جواب باکیفیت تولید می‌کند. این روش، جست‌وجوی خود را از حل اولیه شروع کرده و مسیری در همسایگی این حل، به‌منظور رسیدن به حل کمکی تولید می‌کند. اگرچه این روش یک جزو لازم از الگوریتم جست‌وجوی پراکنده نمی‌باشد، اما اجرای الگوریتم با آن به نتایج بهتری منجر می‌گردد. همچنین برای هر یک از جواب‌های موجود در جمعیت جواب‌ها، یک‌بار جواب مذکور به‌عنوان حل کمکی در نظر گرفته می‌شود و جواب‌های مسیر متصل‌کننده بین جواب اولیه و کمکی تولیدشده و بار دیگر جواب‌های مسیر بازگشت از حل کمکی به حل اولیه تولید خواهند شد. به‌عبارت‌دیگر، روش خطدار کردن مسیر برای هر یک از حل‌های موجود در جمعیت جواب‌ها به‌طور جداگانه استفاده می‌گردد. جواب‌های به‌دست‌آمده برای همه جواب‌ها در یک استخر ذخیره‌شده و درنهایت جواب‌های پراکنده لازم، با توجه به معیار تابع برازندگی c_s انتخاب خواهند شد. جهت محاسبه تابع برازندگی، ابتدا جواب‌ها با استفاده از قاعده دب سطح‌بندی گردیده و معیار فاصله ازدحام برای هر جواب با توجه به سطحی که جواب در آن قرار دارد، محاسبه می‌گردد. سپس برای هر جواب، معیار c_s به‌صورت **رابطه (۱۴)** محاسبه می‌گردد که نشان‌دهنده مقدار برازندگی هر جواب می‌باشد.

$$C_s = \frac{rank}{crowding_dis}. \qquad (۱۴)$$

در **رابطه (۱۴)**، $crowding - dis$ نشان‌دهنده فاصله ازدحام و $rank$ شماره سطحی است که جواب در آن قرار دارد. N جواب که دارای C_S کم‌تری هستند به‌عنوان جواب‌های پراکنده اولیه انتخاب می‌شوند.

روش بهبود جواب‌های پراکنده تولیدشده

در این بخش، یک روش بهبوددهنده بر روی هر یک از جواب‌های پراکنده تولیدشده در مرحله قبل در راستای افزایش کیفیت جواب‌ها اعمال می‌گردد. برای طراحی روش بهبود جواب‌ها در این مقاله، از ساختار جست‌وجوی همسایگی متغیر استفاده گردیده است. ساختار *VNS* شامل سه عملگر جست‌وجوی همسایگی می‌باشد که در ادامه شرح داده شده‌اند.

۱. عملگر جست‌وجوی همسایگی اول: این عملگر به این صورت عمل می‌کند که از بین کارکنان یکی به‌تصادف انتخاب شده و سعی می‌شود که تخصیص‌های این کارمند در برخی روزها (با رعایت محدودیت‌ها) لغو شده و به کارمندی که می‌تواند آن تخصیص‌ها را داشته باشد، داده می‌شود.
۲. عملگر جست‌وجوی همسایگی دوم: این عملگر به این صورت عمل می‌کند که یک کارمند به‌تصادف انتخاب شده و در تمام شیفت‌ها اگر آن کارمند به سطحی پایین‌تر از سطح مهارت خودش تخصیص داده شده باشد، سعی می‌شود که تخصیص وی به سطح مهارتش نزدیک‌تر شود. به این صورت که در صورت امکان تخصیص این کارمند لغو و به افراد واجد شرایط داده می‌شود و یا تخصیص این کارمند با کارمندی که در سطحی نزدیک‌تر به سطح مهارت کارمند موردبررسی تخصیص داده شده است تعویض خواهد شد.
۳. عملگر جست‌وجوی همسایگی سوم: در این عملگر، اندیس یک روز و یک کارمند به‌طور تصادفی تولیدشده و تخصیص کارمند موردنظر (در صورت وجود)، در آن روز با حفظ شرایط شدنی بودن لغو و به کارمند واجد شرایط دیگری که مطلوبیت بالاتری دارد، داده می‌شود.

همان‌طور که گفته شد، ساختار *VNS* از ترکیب این سه عملگر مطابق **شکل ۳** حاصل می‌شود. هرکدام از جواب‌های موجود در جمعیت جواب به الگوریتم *VNS* داده می‌شود و یک جواب به‌عنوان خروجی دریافت خواهد شد و سپس جایگزین جواب ورودی خواهد شد. در واقع ساختار کلی رویه بهبود نیز مطابق **شکل ۴** خواهد بود.

{برای هر یک از حل‌های ورودی
K=1
تا هنگامی که معیار توقف مشاهده شد، انجام بده
حل جدید=درخواست NSS نوع K
اگر حل جدید بهتر است، سپس
K=1
در غیر این صورت
K=k+1
اگر k=4 سپس
K=1
پایان اگر
پایان اگر
پایان در حالی که.}

شکل ۲- الگوریتم VNS.
Figure 2- VNS algorithm.

{برای هر Si در جمعیت ورودی
Si= اعمال رویه VNSدر Si.
S Si= اعمال رویه شدنی بودن بر جواب و تولید یک جواب شدنی.}

شکل ۳- ساختار کلی رویه بهبود.
Figure 3- General structure of the improvement procedure.

۱. اگر کارمندی به بیش از ساعت تعیین‌شده تخصیص داده شده باشد، یا پس از شیفت شب، به‌روز بعد تخصیص داده شده باشد، یا در دو روز بعد از تعطیلی باز هم به شیفت شب تخصیص داده شده باشد، یا هرگونه تخصیص غیرمجاز دیگری (با توجه به محدودیت‌های مدل) وجود داشته باشد، آن تخصیص لغو (با توجه به محدودیتی که نقض شده است) و سپس تخصیص‌ها در شیفتی که تخصیص لغو شده است با توجه به میزان تقاضا بررسی‌شده و اصلاح خواهند شد.
۲. اگر یک کارمند m بامهارت تکنسین به مهارت کارشناس که بالاتر از سطح مهارت خودش است، تخصیص داده شده باشد.

اگر تعداد تخصیص مهارت کارشناس در آن شیفت بیش از میزان تقاضا باشد، تخصیص آن کارمند لغو می‌شود.

اگر کم‌تر یا مساوی باشد، از بین کارمندانی که می‌توانند در این سطح کار کنند و تخصیص داده نشده‌اند در صورت برقراری بقیه محدودیت‌ها یکی انتخاب شده و تخصیص داده شده و تخصیص کارمند m لغو می‌شود. اگر کارمندی در سطح مهارت کارمند m تخصیص داده شده باشد و بتواند در سطح مهارت کارشناس نیز کار کند، تخصیصش با کارمند m عوض می‌شود. درصورتی‌که این کارها امکان‌پذیر نباشد، کارمندانی که می‌توانند در این سطح تخصیص یابند، در صورت امکان تخصیصشان در شیفت‌های قبل یا بعد تغییر داده می‌شود تا بتوانند در شیفت جاری در سطح مهارت کارشناس تخصیص یابند.

۱. برای مهارت کارشناس سطح تقاضا رعایت نشده.

اگر تعداد تخصیص‌ها بیشتر از سطح تقاضا باشد تا برقراری رابطه تساوی برخی از تخصیص‌ها لغو می‌شوند.

اگر کم‌تر از سطح تقاضا باشد، سعی می‌شود کارمندی با رعایت محدودیت‌ها انتخاب و تخصیص داده شود و مانند حالت قبل اگر کارمندی پیدا نشد، در صورت امکان با تغییر زمان‌بندی شیفت‌های قبل و بعد، سطح تقاضا براورده شود.

۱. اگر کارمندی به بیش از ساعت تعیین شده تخصیص داده شده باشد، یا پس از شیفت شب ، به روز بعد تخصیص داده شده باشد، یا در دو روز بعد از تعطیلی باز هم به شیفت شب تخصیص داده شده باشد، یا هرگونه تخصیص غیر مجاز دیگری (با توجه به محدودیت‌های مدل) وجود داشته باشد، آن تخصیص لغو (با توجه به محدودیتی که نقض شده است) و سپس تخصیص‌ها در شیفتی که تخصیص لغو شده است با توجه به میزان تقاضا بررسی شده و اصلاح خواهند شد.

۲. اگر یک کارمند m با مهارت تکنسین به مهارت کارشناس که بالاتر از سطح مهارت خودش است، تخصیص داده شده باشد:

- ✓ اگر تعداد تخصیص مهارت کارشناس در آن شیفت بیش از میزان تقاضا باشد، تخصیص آن کارمند لغو می شود.
- ✓ اگر کمتر یا مساوی باشد، از بین کارمندانی که می‌توانند در این سطح کار کنند و تخصیص داده نشده‌اند در صورت برقراری بقیه محدودیت‌ها یکی انتخاب شده و تخصیص داده شده و تخصیص کارمند m لغو می شود. اگر کارمندی در سطح مهارت کارمند m تخصیص داده شده باشد و بتواند در سطح مهارت کارشناس نیز کارکند، تخصیصش با کارمند m عوض می‌شود. در صورتی که این کارها امکان پذیر نباشد، کارمندانی که می‌توانند در این سطح تخصیص یابند، در صورت امکان تخصیصشان در شیفت‌های قبل یا بعد تغییر داده می‌شود تا بتوانند در شیفت جاری در سطح مهارت کارشناس تخصیص یابند.

۳. برای مهارت کارشناس سطح تقاضا رعایت نشده:

- ✓ اگر تعداد تخصیص‌ها بیشتر از سطح تقاضا باشد، تا برقراری رابطه تساوی برخی از تخصیص‌ها لغو می‌شوند.
- ✓ اگر کمتر از سطح تقاضا باشد، سعی می‌شود کارمندی با رعایت محدودیت‌ها انتخاب و تخصیص داده شود و مانند حالت قبل اگر کارمندی پیدا نشد، در صورت امکان با تغییر زمانبندی شیفت های قبل و بعد، سطح تقاضا براورده شود.

شکل ۴- رویه شدنی بودن جواب.

Figure 4- Procedural feasibility of the solution.

برای بقیه محدودیت‌ها با توجه به ماهیت محدودیت، کارمندان به همین شیوه انتخاب شده و زمان‌بندی‌ها در صورت امکان تا برقراری محدودیت‌ها تغییر می‌کنند. اگر برای یک محدودیت نتوان کارمند با رعایت همه شرایط انتخاب کرد، از آن جواب نمی‌توان به یک جواب شدنی رسید و رویه متوقف خواهد شد.

به‌روزرسانی مجموعه مرجع

در این پایان‌نامه، مجموعه مرجع از دو زیرمجموعه به نام‌های *Refset1* (جواب‌های باکیفیت) و *Refset2* (جواب‌های پراکنده) تشکیل شده است. بیشینه ظرفیت این دو زیرمجموعه به ترتیب b_1 و b_2 است، به‌عبارت‌دیگر $|Refset| = b \leq b_1 + b_2$. برای تشکیل مجموعه مرجع، ابتدا زیرمجموعه *refset1* تشکیل می‌گردد. بدین منظور از آرشیو پارتو حداکثر b_1 جواب غالب غیرتکراری که دارای بیش‌ترین پراکندگی می‌باشند، انتخاب و به زیرمجموعه *refset1* اضافه می‌شوند. اگر تعداد جواب‌های موجود در آرشیو از b_1 کم‌تر باشند، بقیه مجموعه از بین بهترین جواب‌های موجود در جمعیت جواب‌ها، انتخاب خواهند شد. برای تشکیل زیرمجموعه *refset2*، از سه فاکتور سطح، فاصله ازدحام و کمینه فاصله اقلیدسی از مجموعه *refset1* استفاده می‌شود. فاصله ازدحام، پراکندگی بین جواب‌های *refset2* و فاصله اقلیدسی پراکندگی بین جواب‌های *refset2* و *refset1* را تضمین می‌کنند. برای هرکدام از جواب‌های موجود در جمعیت جواب‌ها که در *refset1* قرار ندارند، سه فاکتور فوق، دو معیار *[cs=rank/crowding-distance]* و *[1/Euclidean-distance]* محاسبه می‌شوند. سپس دو معیار فوق به‌عنوان دو هدف برای جواب‌ها در نظر گرفته شده و از بین جواب‌هایی که با این دو هدف غالب هستند، حداکثر b_2 جواب غیرتکراری انتخاب و به زیرمجموعه *refset2* اضافه می‌شوند.

روش تولید زیرمجموعه‌ها

با استفاده از این روش، زیرمجموعه‌هایی از جواب‌های مجموعه مرجع به‌منظور استفاده در روش ترکیب جواب‌ها برای تولید جواب‌های جدید، تشکیل خواهند شد. در اینجا سه نوع زیرمجموعه (s_1,s_2,s_3) دوتایی از جواب‌های مجموعه مرجع تشکیل می‌شوند که به شرح زیر می‌باشند:

۱. S_1: تمام زیرمجموعه‌های دوتایی مجموعه *refset1* می‌باشد که حداکثر دارای $|b_1-1|$ است.
۲. S_2: تمام زیرمجموعه‌های دوتایی مجموعه *refset2* می‌باشد که حداکثر دارای $|b_2-1|$ است.
۳. S_3: این زیرمجموعه دوتایی شامل جواب‌های *refset1* و *refset2* می‌باشد که هر عضو آن بدین‌صورت ساخته می‌شود که عنصر اول هر عضو از اعضای *refset1* انتخاب می‌شود و عنصر دوم یکی از اعضای *refset2* می‌باشد که بیشترین فاصله اقلیدسی را با عنصر اول داشته باشد. این زیرمجموعه شامل b_1 عضو است.

روش ترکیب زیرمجموعه‌های منتخب

در این مقاله از یک عملگر تقاطع تک نقطه‌ای جهت ترکیب جواب‌ها استفاده شده است. ورودی این عملگر، دو جواب به‌عنوان والد می‌باشند. در این عملگر، i به‌طور تصادفی به‌عنوان اندیس یک روز انتخاب گردیده، سپس فرزند اول کلیه تخصیص‌های روز اول تا روز iام خود را از والد اول می‌گیرد و مابقی روزهای فرزند اول تا جایی که امکان داشته باشد و با حفظ شرایط شدنی بودن، مانند والد دوم تخصیص داده می‌شوند. جهت تشکیل فرزند دوم نیز مانند فرزند اول اقدام می‌شود، با این تفاوت که نقش والدین عوض خواهد شد.

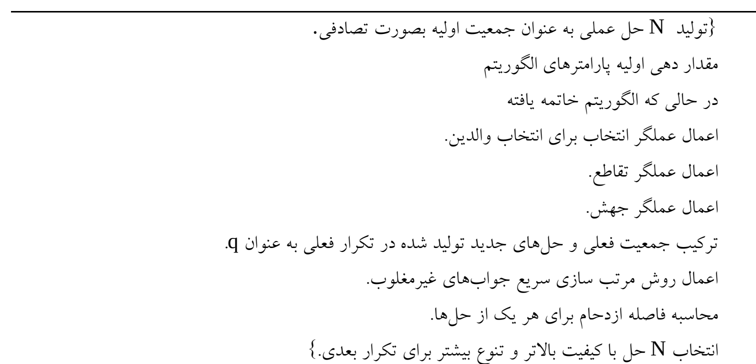
تشکیل مجموعه جدید جواب‌ها برای تکرار بعدی

فرض کنید در انتهای یک تکرار الگوریتم جست‌وجوی پراکنده، تعداد جواب‌های غالب موجود در آرشیو پارتو برابر ω باشد. برای تشکیل مجموعه جدید، یکی از حالت‌های زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱. اگر $\omega = N$ باشد، تمام جواب‌های پارتو به‌عنوان ورودی‌های روش تولید جواب‌های پراکنده درنظرگرفته می‌شوند.
۲. اگر $\omega > N$ باشد، N جواب که دارای پراکندگی بیشتری هستند، به‌عنوان ورودی‌های روش تولید جواب‌های پراکنده در نظر گرفته می‌شوند.
۳. اگر $\omega < N$ باشد، تمام جواب‌های پارتو به‌عنوان جواب‌های ابتدایی روش تولید جواب‌های پراکنده در نظر گرفته شده و $N - \omega$ جواب باقیمانده از بین جواب‌های مغلوبی که از فاصله اقلیدسی کم‌تری نسبت به نقطه آرمانی پویا برخوردار هستند، انتخاب می‌گردند. نقطه آرمانی پویا یک نقطه آرمانی تقریبی است که مختصاتش مقدار بهینه محلی هر یک از توابع هدف می‌باشد. نقطه آرمانی پویا، شامل بهترین توابع هدفی است که تابه‌حال حاصل شده‌اند.

۲-۳- الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب

ساختار کلی این الگوریتم به‌صورت **شکل ۶** می‌باشد. در ادامه نیز جزییات این الگوریتم بیان شده است.


{تولید N حل عملی به عنوان جمعیت اولیه بصورت تصادفی.
مقدار دهی اولیه پارامترهای الگوریتم
در حالی که الگوریتم خاتمه یافته
اعمال عملگر انتخاب برای انتخاب والدین.
اعمال عملگر تقاطع.
اعمال عملگر جهش.
ترکیب جمعیت فعلی و حل‌های جدید تولید شده در تکرار فعلی به عنوان q.
اعمال روش مرتب سازی سریع جواب‌های غیرمغلوب.
محاسبه فاصله ازدحام برای هر یک از حل‌ها.
انتخاب N حل با کیفیت بالاتر و تنوع بیشتر برای تکرار بعدی.}

شکل ۵- ساختار کلی الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی غیر مغلوب.
Figure 5- General structure of the genetic algorithm with non-dominated sorting.

در مورد الگوریتم *NSGAII* تولید جواب‌های اولیه به‌صورت تصادفی است. در واقع به‌طور تصادفی N جواب شدنی به‌عنوان جمعیت تکرار اول الگوریتم تولید خواهند شد. برای انتخاب والدین از روش تورنمنت دوتایی استفاده شده است. در هر بار انتخاب، دو جواب غیر مغلوب به‌عنوان والد انتخاب خواهند شد. همچنین از یک عملگر تقاطع تک نقطه‌ای استفاده شده است که کاملا مانند عملگر تقاطع شرح داده شده در بخش ترکیب جواب‌ها در الگوریتم جست‌وجوی پراکنده می‌باشد. در پیاده‌سازی این الگوریتم در عملگر جهش، سه اندیس روز، شیفت و کارمند به‌طور تصادفی انتخاب شده‌اند و اگر آن کارمند در آن روز و آن شیفت تخصیص داده شده باشد، تخصیص لغو شده و به کارمند واجد شرایط دیگری که مطلوبیت بالاتری دارد، داده می‌شود.

۴- نتایج محاسباتی

در این مقاله، یک مدل ریاضی جدید برای مساله زمان‌بندی نیروی انسانی چند مهارته چندهدفه بر اساس یک مطالعه موردی ارایه شد. این مساله، به دلیل ساختار حاکم بر آن و پیچیدگی آن ازلحاظ زمان حل در دسته مسایل غیر چندجمله‌ای سخت قرار می‌گیرد. دو الگوریتم فرا ابتکاری متفاوت

برای حل مدل چندهدفه تعمیم داده شد. به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی، ۷ مساله نمونه با استفاده از الگوریتم‌های تعمیم‌یافته حل خواهد شد. در ادامه، نتایج محاسباتی حاصل از حل مدل با استفاده از الگوریتم‌های تعمیم‌یافته که در محیط نرم‌افزار *MATLAB R2012a* بر روی یک کامپیوتر شخصی با مشخصات ۴ گیگابایت حافظه رم و ۲/۵۳ گیگاهرتز سی‌پی‌یوی چهار هسته‌ای کد شده است، به‌تفصیل موردبحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۴- مشخصات مسایل نمونه

از آن‌جایی که مدل ریاضی ارایه شده برای مساله زمان‌بندی نیروی انسانی چند مهارته چندهدفه یک مدل جدید مبتنی بر یک مطالعه موردی می‌باشد و به دلیل ماهیت خاص مساله تعریف‌شده، استفاده از مسایل نمونه موجود در حیطه زمان‌بندی نیروی انسانی کمکی به مقایسه و ارزیابی کارایی الگوریتم‌ها نمی‌کند، لذا از ۷ مساله نمونه برای بررسی عملکرد محدودیت‌ها و ارزیابی کارایی الگوریتم‌های تعمیم‌یافته استفاده خواهد شد. **جدول ۲**، ۷ مساله موردبررسی را نشان می‌دهد. **جدول ۲**، ویژگی‌های مشترک مسایل نمونه را نشان می‌دهد. **جدول ۳** تا **جدول ۷**، تعداد کارکنان، تخصص و سطح مهارت واقعی هر نیروی کار، میزان مطلوبیت استفاده از هر نیروی کار و همچنین میزان دستمزد برای هر شیفت را برای ۲ مساله نمونه مبتنی بر واقعیت نشان می‌دهد (اطلاعات مربوط به سایر مسایل نمونه به علت حجم زیاد در پیوست شماره ۱ آورده شده است).

جدول ۳- مسایل تولیدشده.
Table 3- Generated issues.

سایز	مثال	تعداد نیروی انسانی	تعداد تخصص
کوچک	مساله ۱	40	3
بزرگ	مساله ۲	71	3
	مساله ۳	90	3
	مساله ۴	142	3
	مساله ۵	154	3
خیلی بزرگ	مساله ۶	296	3
	مساله ۷	426	3

جدول ۴- ویژگی‌های مشترک مسایل نمونه.
Table 4- Common features of problems.

افق برنامه‌ریزی	۲۸ روز
تعداد شیفت‌ها	۳ شیفت (شیفتm: صبح، شیفتa: بعدازظهر و شیفتn: شب)
تعداد تخصص‌ها	۳ تخصص (تخصص S1: مکانیک، تخصص s2: برق،تخصص S3: الکترونیک)
تعداد سطوح مهارت در هر تخصص	۲ سطح مهارت (مهارت ۱: تکنسین، مهارت ۲: کارشناس)
طول زمانی هر شیفت	۸ ساعت
حداکثر ساعات کاری مجاز برای هر نیروی کار در طی یک روز	۸ ساعت
حداقل ساعات کاری موردنیاز برای هر نیروی کار در طی دوره زمان‌بندی	۱۳۶ ساعت
حداکثر ساعات کاری مجاز برای هر نیروی کار در طی دوره زمان‌بندی	۱۷۶ ساعت
ضریب جریمه برای تخصیص هر نیروی کار در سطح مهارت پایین‌تر از مهارت واقعی‌اش در یک شیفت	۱۵۰ واحد پولی

جدول ۵- تعداد نیروهای موردنیاز مساله نمونه ۱ در هر شیفت و هر روز.

Table 5- Number of workers required for Example 1 per shift and per day.

	صبح	عصر	شب	کل یک روز	کل موجودی
کارشناس مکانیک	2	1	1	4	6
تکنسین مکانیک	3	4	3	10	13
کارشناس برق	2	1	1	4	6
تکنسین برق	3	3	2	8	11
کارشناس الکترونیک	-	-	-	-	-
تکنسین الکترونیک	1	1	1	3	4
کل یک شیفت	11	10	8	29	40

جدول ۶- سایر ویژگی‌های مساله نمونه ۱.

Table 6- Other characteristics of problem 1.

شماره کارکنان	تخصص	سطح مهارت	Cmm	Cma	Cmn	Pm
1	S1	کارشناس	100	100	130	0.7
2	S1	کارشناس	100	100	130	0.7
3	S1	کارشناس	110	110	143	0.8
4	S1	کارشناس	115	115	150	0.85
5	S1	کارشناس	120	120	156	0.9
6	S1	کارشناس	120	120	156	0.9
7	S1	تکنسین	65	65	84	0.6
8	S1	تکنسین	65	65	84	0.6
9	S1	تکنسین	65	65	84	0.6
10	S1	تکنسین	70	70	90	0.7
11	S1	تکنسین	70	70	90	0.7
12	S1	تکنسین	70	70	90	0.7
13	S1	تکنسین	75	75	99	0.75
14	S1	تکنسین	80	80	104	0.8
15	S1	تکنسین	80	80	104	0.8
16	S1	تکنسین	80	80	104	0.8
17	S1	تکنسین	85	85	110	0.85
18	S1	تکنسین	90	90	115	0.9
19	S1	تکنسین	90	90	115	0.9
20	S2	کارشناس	95	95	126	0.65
21	S2	کارشناس	100	100	130	0.7
22	S2	کارشناس	110	110	143	0.8
23	S2	کارشناس	110	110	143	0.8
24	S2	کارشناس	120	120	156	0.9
25	S2	کارشناس	120	120	156	0.9
26	S2	تکنسین	60	60	79	0.55
27	S2	تکنسین	65	65	84	0.6
28	S2	تکنسین	70	70	90	0.7
29	S2	تکنسین	70	70	90	0.7
30	S2	تکنسین	75	75	99	0.75
31	S2	تکنسین	75	75	99	0.75
32	S2	تکنسین	80	80	104	0.8
33	S2	تکنسین	80	80	104	0.8

جدول ۶- ادامه.
Table 6- Continued.

شماره کارکنان	تخصص	سطح مهارت	Cmm	Cma	Cmn	Pm
34	S2	تکنسین	85	85	110	0.85
35	S2	تکنسین	85	85	110	0.85
36	S2	تکنسین	90	90	115	0.9
37	S3	تکنسین	70	70	90	0.7
38	S3	تکنسین	75	75	99	0.75
39	S3	تکنسین	75	75	99	0.75
40	S3	تکنسین	85	85	110	0.85

جدول ۷- تعداد نیروهای موردنیاز مساله نمونه ۲ در هر شیفت و هر روز.
Table 7- Number of workers required for Example 2 per shift and per day.

	صبح	عصر	شب	کل یک روز	کل موجودی
کارشناس مکانیک	3	2	2	7	10
تکنسین مکانیک	7	6	5	18	24
کارشناس برق	3	2	1	6	9
تکنسین برق	6	5	6	17	22
کارشناس الکترونیک	-	-	-	-	-
تکنسین الکترونیک	2	1	1	4	6
کل یک شیفت	21	16	15	52	71

جدول ۸- سایر ویژگی‌های مساله نمونه ۲.
Table 8- Other features of problem 2.

شماره کارکنان	تخصص	سطح مهارت	Cmh1	Cmh2	Cmh3	Pm
1	مکانیک	کارشناس	140	140	185	0.95
2	مکانیک	کارشناس	135	135	178	0.90
3	مکانیک	کارشناس	135	135	178	0.90
4	مکانیک	کارشناس	130	130	170	0.85
5	مکانیک	کارشناس	130	130	170	0.85
6	مکانیک	کارشناس	130	130	170	0.85
7	مکانیک	کارشناس	125	125	165	0.80
8	مکانیک	کارشناس	120	120	160	0.75
9	مکانیک	کارشناس	120	120	160	0.75
10	مکانیک	کارشناس	115	115	155	0.7
11	مکانیک	تکنسین	110	110	145	0.95
12	مکانیک	تکنسین	110	110	145	0.95
13	مکانیک	تکنسین	110	110	145	0.95
14	مکانیک	تکنسین	106	106	140	0.90
15	مکانیک	تکنسین	106	106	140	0.90
16	مکانیک	تکنسین	106	106	140	0.90
17	مکانیک	تکنسین	103	103	136	0.85
18	مکانیک	تکنسین	103	103	136	0.85
19	مکانیک	تکنسین	103	103	136	0.85
20	مکانیک	تکنسین	103	103	136	0.85
21	مکانیک	تکنسین	100	100	130	0.80
22	مکانیک	تکنسین	100	100	130	0.80

جدول ۸- ادامه.
Table 8- Continued.

شماره کارکنان	تخصص	سطح مهارت	Cmh1	Cmh2	Cmh3	Pm
23	مکانیک	تکنسین	100	100	130	0.80
24	مکانیک	تکنسین	97	97	125	0.75
25	مکانیک	تکنسین	97	97	125	0.75
26	مکانیک	تکنسین	97	97	125	0.75
27	مکانیک	تکنسین	97	97	125	0.75
28	مکانیک	تکنسین	93	93	120	0.70
29	مکانیک	تکنسین	93	93	120	0.70
30	مکانیک	تکنسین	93	93	120	0.70
31	مکانیک	تکنسین	93	93	120	0.70
32	مکانیک	تکنسین	90	90	115	0.65
33	مکانیک	تکنسین	90	90	115	0.65
34	مکانیک	تکنسین	90	90	115	0.65
35	برق	کارشناس	140	140	185	0.95
36	برق	کارشناس	140	140	185	0.95
37	برق	کارشناس	135	135	178	0.90
38	برق	کارشناس	130	130	170	0.85
39	برق	کارشناس	130	130	170	0.85
40	برق	کارشناس	125	125	165	0.80
41	برق	کارشناس	120	120	160	0.75
42	برق	کارشناس	120	120	160	0.75
43	برق	کارشناس	115	115	155	0.70
44	برق	تکنسین	110	110	145	0.95
45	برق	تکنسین	110	110	145	0.95
46	برق	تکنسین	110	110	145	0.95
47	برق	تکنسین	106	106	140	0.90
48	برق	تکنسین	106	106	140	0.90
49	برق	تکنسین	106	106	140	0.90
50	برق	تکنسین	106	106	140	0.90
51	برق	تکنسین	103	103	136	0.85
52	برق	تکنسین	103	103	136	0.85
53	برق	تکنسین	103	103	136	0.85
54	برق	تکنسین	100	100	130	0.80
55	برق	تکنسین	100	100	130	0.80
56	برق	تکنسین	97	97	125	0.75
57	برق	تکنسین	97	97	125	0.75
58	برق	تکنسین	97	97	125	0.75
59	برق	تکنسین	97	97	125	0.75
60	برق	تکنسین	93	93	120	0.70
61	برق	تکنسین	93	93	120	0.70
62	برق	تکنسین	93	93	120	0.70
63	برق	تکنسین	90	90	115	0.65
64	برق	تکنسین	90	90	115	0.65
65	برق	تکنسین	90	90	115	0.65
66	الکترونیک	تکنسین	110	110	145	0.95

جدول ۸- ادامه.
Table 8- Continued.

شماره کارکنان	تخصص	سطح مهارت	Cmh1	Cmh2	Cmh3	Pm
67	الکترونیک	تکنسین	106	106	140	09
68	الکترونیک	تکنسین	106	106	140	09
69	الکترونیک	تکنسین	103	103	136	0.85
70	الکترونیک	تکنسین	103	103	136	0.85
71	الکترونیک	تکنسین	100	100	130	0.80

۴-۲- تنظیم پارامترها در الگوریتم‌های پیشنهادی به روش تاگوچی

در تمامی الگوریتم‌های فرا ابتکاری همواره پارامتر یا پارامترهایی وجود دارد که بایستی مقادیر آن‌ها بسته به هر مساله‌ای تعیین شوند. برای تنظیم پارامترهای موجود در الگوریتم‌های پیشنهادی این پژوهش، از روش آماری طراحی آزمایش‌های تاگوچی استفاده شده است. در روش تاگوچی، آرایه‌های متعامد، برای مطالعه‌ی تعداد زیادی از متغیرهای تصمیم با تعداد کمی از آزمایش‌ها استفاده شده است. تاگوچی فاکتورها را به دو کلاس اصلی تقسیم می‌کند: فاکتورهای قابل‌کنترل و فاکتورهای نویز. فاکتورهای نویز آن‌هایی هستند که نمی‌توانند به‌طور مستقیم کنترل شوند. **جدول ۱۳** بهترین سطح برای این فاکتورها را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در **جدول ۸** مشاهده می‌شود، *Mutation* بیش‌ترین تاثیر را بر روی الگوریتم *NSGA-II* دارد، *Pop size* و *N_Iteration* به‌ترتیب دیگر فاکتورهای موثر بر الگوریتم *NSGA-II* می‌باشند.

جدول ۹- رتبه‌بندی اثرگذاری هر فاکتور الگوریتم NSGA-II.
Table 9- Ranking of the effectiveness of each factor of the NSGA-II algorithm.

Response Table for Signal to Noise Rations Smaller is Better			
Level	Pop Size	N_Iteration	Mutation
1	10.122	14.193	5.647
2	15.174	8.657	11.539
3	9.147	11.839	12.590
Delta	6.027	5.536	6.944
Rank	2	3	1

۴-۳- نتایج محاسباتی

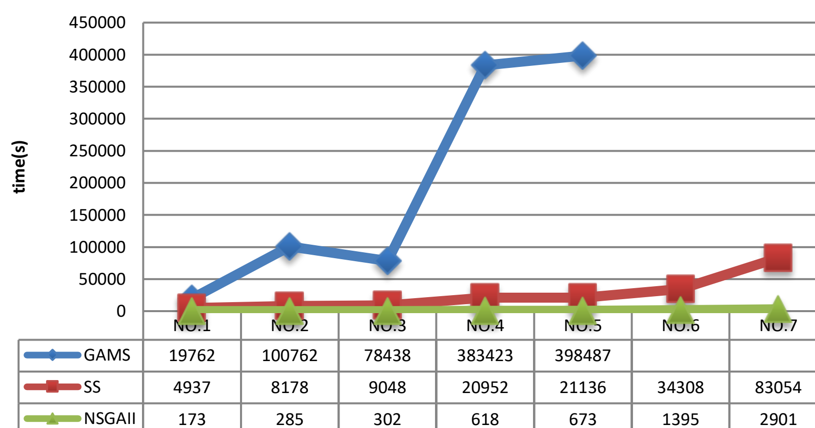
دراین بخش عملکرد الگوریتم‌های *SS* و *NSGA-II* و حل‌کننده دقیق *GAMS* برای حل مساله نیروی انسانی مقایسه می‌شوند. الگوریتم‌های *SS* و *NSGA-II* پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار *مطلب R2012a* کدنویسی شده‌اند و مسایل موردبررسی، در یک کامپیوتر شخصی با ۴ گیگابایت رم، سی‌پی‌یو ۴ هسته‌ای و قدرت پردازنده ۲/۵۳ گیگاهرتز اجرا شده‌اند. مقایسه جواب‌های به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار *GAMS* 24.2 و الگوریتم‌های توسعه‌یافته برای کوچک‌ترین اندازه مساله (مساله نمونه ۱)، عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی را تایید می‌کند.

در این قسمت مسایل تولیدشده توسط الگوریتم‌های پیشنهادی *SS* و *NSGA-II* حل شده است. در ابتدا زمان حل مسایل مختلف مقایسه می‌شود، زمان حل مسایل کوچک و بزرگ توسط الگوریتم‌های *SS* و *NSGA-II* حل‌کننده *GAMS* مطابق **جدول ۹** و **شکل ۷** نشان داده شده است. همچنین نتایج بررسی شاخص‌های عملکردی حاصل از هر الگوریتم مطابق **جدول ۱۰** و **شکل ۸** تا **شکل ۱۰** نشان داده شده است. نقد و بررسی نتایج به‌دست‌آمده درمورد عملکرد این الگوریتم‌ها در ادامه انجام‌شده است. همان‌طوری که از **شکل ۷** پیداست مساله *NP-Hard* بوده و زمان حل آن بسیار طولانی و زمان‌بر می‌باشد. همچنین در مقایسه بین دو الگوریتم *SS* و *NSGA-II* الگوریتم *NSGA-II* سریع‌تر از الگوریتم *SS* عمل می‌کند و عملکرد بهتری ازلحاظ زمان حل دارد که این به دلیل فازهای کم‌تر این الگوریتم می‌باشد.

جدول ۱۰- نتایج زمان حل مسایل مختلف با استفاده از روش‌های حل مختلف.

Table 10- Results of solving time for different problems using different solution methods.

زمان حل (ثانیه)							
حل‌کننده	مساله ۱	مساله ۲	مساله ۳	مساله ۴	مساله ۵	مساله ۶	مساله ۷
GAMS	19762	100769	78438	383423	398487	-	-
SS	4937	8178	9048	20952	21136	34308	83054
NSGA-II	173	285	302	618	673	1395	2901



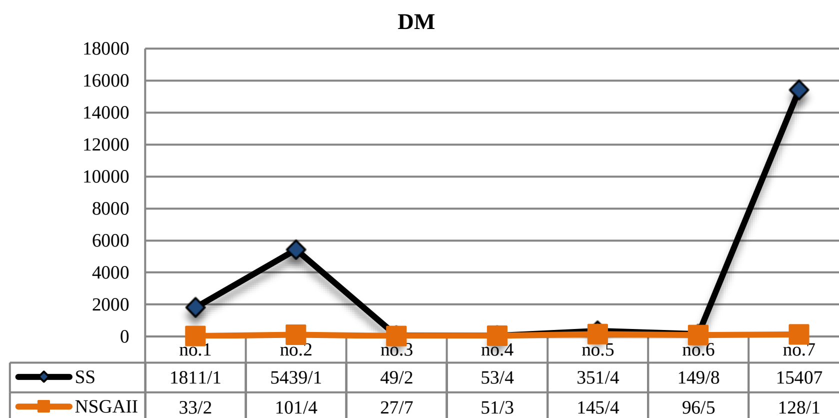
شکل ۶- نتایج زمان حل مسایل مختلف با استفاده از روش‌های حل.

Figure 6- Results of solving time for different problems using solution methods.

جدول ۱۱- مقدار شاخص‌های عملکردی به‌دست‌آمده هر مساله حل‌شده توسط الگوریتم SS و NSGA-II.

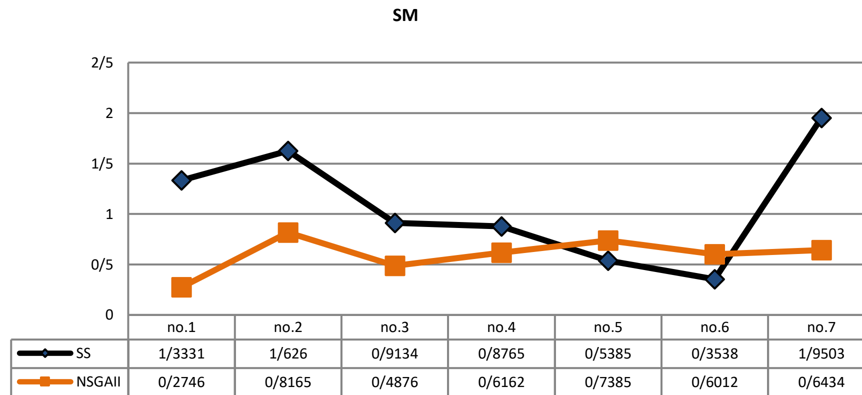
Table 11- The value of the performance indicators obtained for each problem solved by the SS and NSGA-II algorithms.

	Scatter Search			NSGA-II		
متریک	DM	QM	SM	DM	Q M	SM
مساله ۱	1811.1	39.4118	1.3331	33.2	60.5882	0.2746
مساله ۲	5439.1	98.8889	1.6260	101.4	1.1111	0.8165
مساله ۳	49.2	75	0.9134	27.7	25	0.4876
مساله ۴	53.4	95.4545	0.8765	51.3	4.5455	0.6162
مساله ۵	351.4	96.7532	0.5385	145.4	3.2468	0.7385
مساله ۶	149.8	100	0.3538	96.5	0	0.6012
مساله ۷	15407	94.0678	1.9503	128.1	5.9322	0.6434



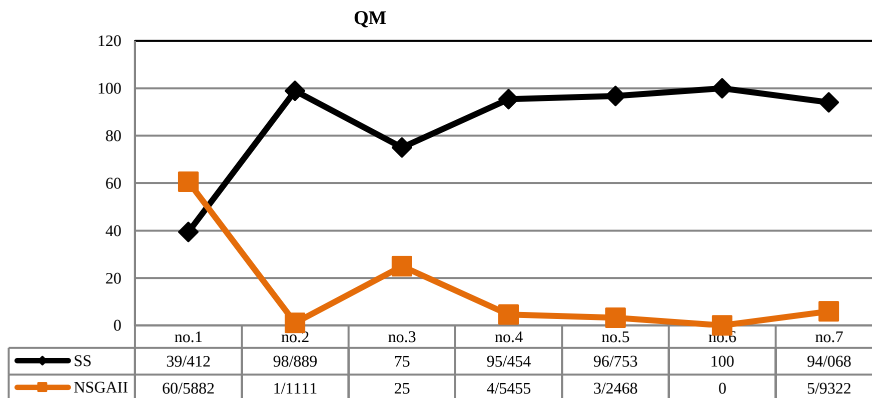
شکل ۷- مقایسه شاخص DM مسایل حل شده توسط دو الگوریتم SS و NSGA-II.

Figure 7- Comparison of DM index of problems solved by SS and NSGA-II dual algorithms.



شکل ۸- مقایسه شاخص QM مسایل حل شده توسط دو الگوریتم SS و NSGA-II.
Figure 8- Comparison of QM index of problems solved by two algorithms SS and NSGA-II.

شاخص کیفی کیفت نشان‌دهنده کیفیت جواب‌های تولیدشده توسط الگوریتم‌های پیشنهادی در مقایسه با یکدیگر می‌باشد. با توجه به **شکل ۱۰** جواب‌های تولیدشده در همه مسایل به‌جز **مساله ۱** نشان‌دهنده این است که الگوریتم *SS* کیفیت بهتری را نسبت به الگوریتم *NSGA-II* داشته است، به‌نحوی‌که در ۵ مساله حل‌های به‌دست‌آمده توسط الگوریتم *SS* در مقایسه با الگوریتم *NSGA-II* کیفیت بالای ۹۰% را ایجاد کرده‌اند.



شکل ۹- مقایسه شاخص SM مسایل حل شده توسط دو الگوریتم SS و NSGA-II.
Figure 9- Comparison of SM index of problems solved by two algorithms SS and NSGA-II.

برخلاف دو شاخص قبلی که هر دو از شاخص‌های کیفی بودند شاخص یکنواختی فضا از شاخص‌های کمی می‌باشد. معیار مقایسه این شاخص نیز بدین‌صورت است که هرچه الگوریتم‌های پیشنهادی در حل یک مساله مقدار کم‌تری را بپذیرند، الگوریتم عملکرد بهتری را داشته است. با توجه به **شکل ۱۰** مشاهده می‌شود که الگوریتم *NSGA-II* عملکرد بهتری را دارد، اما در دو مساله ۵ و ٦ الگوریتم *SS* عملکرد بهتری را نسبت به الگوریتم *NSGA-II* نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل ریاضی جدید برای مساله زمان‌بندی نیروی انسانی چند مهارته چندهدفه مبتنی بر یک مطالعه موردی توسعه شده است. در این مساله، کارکنان بر اساس تخصص و سطح مهارتشان طبقه‌بندی شده‌اند. به همین منظور سعی می‌کند که در دوره‌های برنامه‌ریزی حداکثر دقت و نظم را رعایت کند و به امر آموزش و ارتقای خود توجه بیشتری نماید تا درجه مطلوبیت بیشتری کسب کند که در دوره‌های بعدی برنامه‌ریزی به تعداد شیفت‌های بیشتری تخصیص یابد. از این رو مدل توسعه داده شده یک مدل چندهدفه چند مهارته می‌باشد. مدل در اندازه کوچک حل دقیق گردیده و اعتبار مدل تصدیق شد. به علت NP-*Hard* بودن مساله برای حل مساله در اندازه‌های بزرگ و خیلی بزرگ از روش‌های فرا ابتکاری *SS* و *NSGAII* استفاده گردیده است. توضیحات کاملی در مورد شبه کد و نحوه عملکرد الگوریتم‌ها نیز در این پژوهش بیان شده است. بعد از اجرای برنامه‌های تولیدشده برای مسایل نمونه، نتایج در مورد الگوریتم‌های پیشنهادی و حل دقیق حاصله از نرم‌افزار *GAMS* به شرح زیر به‌دست‌آمده است:

جواب‌های حاصل از مدل ریاضی در اندازه‌های کوچک به‌صورت بهینه حاصل شده است. ازنظر زمان حل، الگوریتم *NSGA-II* نسبت به الگوریتم *SS* بهتر عمل کرده است که به دلیل تعداد فازهای کم‌تر الگوریتم *NSGA-II* می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های عملکردی درمجموع نشان‌دهنده آن است که الگوریتم *SS* عملکرد بهتر و باکیفیت‌تری را در مقایسه با الگوریتم *NSGA-II* ارایه کرده است. مهم‌ترین پیشنهادهایی که برای تحقیقات آتی از برنامه‌ریزی آرمانی برای اولویت و ارجحیت دادن بیشتر به ترجیحات و نیازهای کارکنان استفاده نمود. همچنین پویا نمودن زمان‌بندی را، به‌منظور زمان‌بندی دوره بعد با توجه به زمان‌بندی چند شیفت یا چند روز آخر مدنظر قرار داد. درنهایت نیز می‌توان قواع بیشتر کاری مانند در نظر گرفتن غیبت، استعفا و ترک کار در طی دوره زمان‌بندی و همچنین استخدام و اخراج کارکنان و عدم قطعیت‌ها را به‌صورت فازی و احتمالی در مدل قرار داد.

منابع

[1] Dantzig, G. B. (1954). Letter to the editor-a comment on edie's. *Traffic delays at toll booths, journal of the operations research society of america*, *2*(3), 339–341. https://doi.org/10.1287/opre.2.3.339

[2] Sadjadi, S. J., Heidari, M., & Alinezhad Esboei, A. (2014). Augmented *ε*-constraint method in multiobjective staff scheduling problem: a case study. *The international journal of advanced manufacturing technology*, *70*, 1505–1514. https://doi.org/10.1007/s00170-013-5352-8

[3] Brucker, P., Qu, R., & Burke, E. (2011). Personnel scheduling: Models and complexity. *European journal of operational research*, *210*(3), 467–473. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.11.017

[4] Tien, J. M., & Kamiyama, A. (1982). On manpower scheduling algorithms. *Society for industrial and applied mathematics 24*(3), 275–287. https://doi.org/10.1137/1024063

[5] Baker, K. R. (1976). Workforce allocation in cyclical scheduling problems: A survey. *Journal of the operational research society*, *27*(1), 155–167. https://doi.org/10.1057/jors.1976.30

[6] De Causmaecker, P., Demeester, P., Berghe, G. Vanden, & Verbeke, B. (2004). *A*nalysis of real-world personnel scheduling problems. *Proceedings of the 5th international conference on practice and theory of automated timetabling, pittsburgh* (pp. 183–197). PATAT. https://patatconference.org/patat2004/proceedings/183.pdf

[7] Bard, J. F. (2004). Selecting the appropriate input data set when configuring a permanent workforce. *Computers & industrial engineering*, *47*(4), 371–389. https://doi.org/10.1016/j.cie.2004.09.004

[8] Burke, E. K., De Causmaecker, P., Berghe, G. Vanden, & Van Landeghem, H. (2004). The state of the art of nurse rostering. *Journal of scheduling*, *7*, 441–499. https://doi.org/10.1023/B:JOSH.0000046076.75950.0b

[9] Raff, S. (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. *Computers & operations research*, *10*(2), 63–211. https://doi.org/10.1016/0305-0548(83)90030-8

[10] Mercier, A., Cordeau, J. F., & Soumis, F. (2005). A computational study of Benders decomposition for the integrated aircraft routing and crew scheduling problem. *Computers & operations research*, *32*(6), 1451–1476. https://doi.org/10.1016/j.cor.2003.11.013

[11] Rodrigues, M. M., de Souza, C. C., & Moura, A. V. (2006). Vehicle and crew scheduling for urban bus lines. *European journal of operational research*, *170*(3), 844–862. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.06.035

[12] Franz, L. S., Baker, H. M., Leong, G. K., & Rakes, T. R. (1989). A mathematical model for scheduling and staffing multiclinic health regions. *European journal of operational research*, *41*(3), 277–289. https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90249-X

[13] And, R. G. M., & Johnson, D. S. (1983). Computers and Intractability: A guide to the theory of NP-completeness. *WH freeman & co., san francisco*, *48*(2), 498–500. https://doi.org/10.2307/2273574

[14] Brigandi, A. J., Dargon, D. R., Sheehan, M. J., & Spencer III, T. (1994). AT &T's call processing simulator (CAPS) operational design for inbound call centers. *Interfaces*, *24*(1), 6–28. https://doi.org/10.1287/inte.24.1.6

[15] Parkan, C., Lam, K., & Chan, H. N. (1999). Workforce planning at a bill inquiries centre. *International journal of modelling and simulation*, *19*(2), 118–126. https://doi.org/10.1080/02286203.1999.11760411

[16] Buffa, E. S., Cosgrove, M. J., & Luce, B. J. (1976). An integrated work shift scheduling system. *Decision sciences*, *7*(4), 620–630. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1976.tb00706.x

[17] Molnar, G., Jakobović, D., & Pavelić, M. (2016). Workforce scheduling in inbound customer call centres with a case study. *Applications of evolutionary computation: 19th european conference, evoapplications 2016, porto, portugal, march 30--april 1, 2016, proceedings, part i 19* (pp. 831–846). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31204-0_53

[18] Ertogral, K., & Bamuqabel, B. (2008). Developing staff schedules for a bilingual telecommunication call center with flexible workers. *Computers & industrial engineering*, *54*(1), 118–127. https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.040

[19] Avramidis, A. N., Chan, W., Gendreau, M., L'ecuyer, P., & Pisacane, O. (2010). Optimizing daily agent scheduling in a multiskill call center. *European journal of operational research*, *200*(3), 822–832. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.042

[20] Arabeyre, J. P., Fearnley, J., Steiger, F. C., & Teather, W. (1969). The airline crew scheduling problem: A survey. *Transportation science*, *3*(2), 140–163. https://doi.org/10.1287/trsc.3.2.140

[21] Anbil, R., Gelman, E., Patty, B., & Tanga, R. (1991). Recent advances in crew-pairing optimization at American Airlines. *Interfaces*, *21*(1), 62–74. https://doi.org/10.1287/inte.21.1.62

[22] Mercier, A., & Soumis, F. (2007). An integrated aircraft routing, crew scheduling and flight retiming model. *Computers & operations research*, *34*(8), 2251–2265. https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.09.001

[23] Weide, O., Ryan, D., & Ehrgott, M. (2010). An iterative approach to robust and integrated aircraft routing and crew scheduling. *Computers & operations research*, *37*(5), 833–844. https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.03.024

[24] Dück, V., Ionescu, L., Kliewer, N., & Suhl, L. (2012). Increasing stability of crew and aircraft schedules. *Transportation research part c: Emerging technologies*, *20*(1), 47–61. https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.02.009

[25] Stojković, M., Soumis, F., & Desrosiers, J. (1998). The operational airline crew scheduling problem. *Transportation science*, *32*(3), 232–245. https://doi.org/10.1287/trsc.32.3.232

[26] Dillon, J. E., & Kontogiorgis, S. (1999). US Airways optimizes the scheduling of reserve flight crews. *Interfaces*, *29*(5), 123–131. https://doi.org/10.1287/inte.29.5.123

[27] Sze, S.-N., Suk Fong, A. N., & Chiew, K. L. (2012). An insertion heuristic manpower scheduling for in-flight catering service application. *Computational logistics: third international conference, iccl 2012*, (pp. 206–216). ICCL. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33587-7_15

[28] Guo, Y., Mellouli, T., Suhl, L., & Thiel, M. P. (2006). A partially integrated airline crew scheduling approach with time-dependent crew capacities and multiple home bases. *European journal of operational research*, *171*(3), 1169–1181. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.024

[29] Zeghal, F. M., & Minoux, M. (2006). Modeling and solving a crew assignment problem in air transportation. *European journal of operational research*, *175*(1), 187–209. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.11.028

[30] Medard, C. P., & Sawhney, N. (2007). Airline crew scheduling from planning to operations. *European journal of operational research*, *183*(3), 1013–1027. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.046

[31] Souai, N., & Teghem, J. (2009). Genetic algorithm based approach for the integrated airline crew-pairing and rostering problem. *European journal of operational research*, *199*(3), 674–683. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.10.065

[32] Ho, S. C., & Leung, J. M. Y. (2010). Solving a manpower scheduling problem for airline catering using metaheuristics. *European journal of operational research*, *202*(3), 903–921. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.030

[33] Ghiani, G., Guerriero, E., Manni, A., Manni, E., & Potenza, A. (2013). Simultaneous personnel and vehicle shift scheduling in the waste management sector. *Waste management*, *33*(7), 1589–1594. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.04.001

[34] Peters, E., de Matta, R., & Boe, W. (2007). Short-term work scheduling with job assignment flexibility for a multi-fleet transport system. *European journal of operational research*, *180*(1), 82–98. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.032

[35] de Matta, R., & Peters, E. (2009). Developing work schedules for an inter-city transit system with multiple driver types and fleet types. *European journal of operational research*, *192*(3), 852–865. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.045

[36] Al-Yakoob, S. M., & Sherali, H. D. (2007). Mixed-integer programming models for an employee scheduling problem with multiple shifts and work locations. *Annals of operations research*, *155*, 119–142. https://doi.org/10.1007/s10479-007-0210-4

[37] Bard, J. F., & Purnomo, H. W. (2005). A column generation-based approach to solve the preference scheduling problem for nurses with downgrading. *Socio-economic planning sciences*, *39*(3), 193–213. https://doi.org/10.1016/j.seps.2004.04.001

[38] Beliën, J., & Demeulemeester, E. (2008). A branch-and-price approach for integrating nurse and surgery scheduling. *European journal of operational research*, *189*(3), 652–668. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.060

[39] Dowsland, K. A., & Thompson, J. M. (2000). Solving a nurse scheduling problem with knapsacks, networks and tabu search. *Journal of the operational research society*, *51*(7), 825–833. https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600970

[40] Aickelin, U., & Dowsland, K. A. (2004). An indirect genetic algorithm for a nurse-scheduling problem. *Computers & operations research*, *31*(5), 761–778. https://doi.org/10.1016/S0305-0548(03)00034-0

[41] Jaumard, B., Semet, F., & Vovor, T. (1998). A generalized linear programming model for nurse scheduling. *European journal of operational research*, *107*(1), 1–18. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00330-5

[42] Cheng, B. M. W., Lee, J. H. M., & Wu, J. C. K. (1997). A nurse rostering system using constraint programming and redundant modeling. *IEEE transactions on information technology in biomedicine*, *1*(1), 44–54. https://doi.org/10.1109/4233.594027

[43] Siferd, S. P., & Benton, W. C. (1994). A decision modes for shift scheduling of nurses. *European journal of operational research*, *74*(3), 519–527. https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90228-3

[44] Nooriafshar, M. (1995). A heuristic approach to improving the design of nurse training schedules. *European journal of operational research*, *81*(1), 50–61. https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0131-G

[45] Lukman, D., May, J. H., Shuman, L. J., & Wolfe, H. B. (1991). Knowledge-based schedule formulation and maintenance under uncertainty. *Journal of the society for health systems*, *2*(2), 42–64. https://europepmc.org/article/med/1760545

[46] Burke, E., De Causmaecker, P., & Vanden Berghe, G. (1999). A hybrid tabu search algorithm for the nurse rostering problem. *Simulated evolution and learning: Second asia-pacific conference on simulated evolution and learning*. (pp. 187–194). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-48873-1_25

[47] Burke, E., Cowling, P., De Causmaecker, P., & Berghe, G. Vanden. (2001). A memetic approach to the nurse rostering problem. *Applied intelligence*, *15*, 199–214. https://doi.org/10.1023/A:1011291030731

[48] Bellanti, F., Carello, G., Della Croce, F., & Tadei, R. (2004). A greedy-based neighborhood search approach to a nurse rostering problem. *European journal of operational research*, *153*(1), 28–40. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00096-1

[49] Gutjahr, W. J., & Rauner, M. S. (2007). An ACO algorithm for a dynamic regional nurse-scheduling problem in Austria. *Computers & operations research*, *34*(3), 642–666. https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.018

[50] Burke, E. K., Li, J., & Qu, R. (2010). A hybrid model of integer programming and variable neighbourhood search for highly-constrained nurse rostering problems. *European journal of operational research*, *203*(2), 484–493. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.07.036

[51] Glass, C. A., & Knight, R. A. (2010). The nurse rostering problem: A critical appraisal of the problem structure. *European journal of operational research*, *202*(2), 379–389. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.046

[52] Topaloglu, S., & Selim, H. (2010). Nurse scheduling using fuzzy modeling approach. *Fuzzy sets and systems*, *161*(11), 1543–1563. https://doi.org/10.1016/j.fss.2009.10.003

[53] Bertels, S., & Fahle, T. (2006). A hybrid setup for a hybrid scenario: combining heuristics for the home health care problem. *Computers & operations research*, *33*(10), 2866–2890. https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.01.015

[54] Eveborn, P., Flisberg, P., & Rönnqvist, M. (2006). Laps Care an operational system for staff planning of home care. *European journal of operational research*, *171*(3), 962–976. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.011

[55] Akjiratikarl, C., Yenradee, P., & Drake, P. R. (2007). PSO-based algorithm for home care worker scheduling in the UK. *Computers & industrial engineering*, *53*(4), 559–583. https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.002

[56] Chien, C.-F., Tseng, F.-P., & Chen, C.-H. (2008). An evolutionary approach to rehabilitation patient scheduling: A case study. *European journal of operational research*, *189*(3), 1234–1253. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.062

[57] Topaloglu, S. (2006). A multi-objective programming model for scheduling emergency medicine residents. *Computers & industrial engineering*, *51*(3), 375–388. https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.08.003

[58] Topaloglu, S. (2009). A shift scheduling model for employees with different seniority levels and an application in healthcare. *European journal of operational research*, *198*(3), 943–957. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.10.032

[59] Yang, C. C., Lin, W. T., Chen, H. M., & Shi, Y. H. (2009). Improving scheduling of emergency physicians using data mining analysis. *Expert systems with applications*, *36*(2), 3378–3387. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.02.069

[60] Beliën, J., Demeulemeester, E., & Cardoen, B. (2009). A decision support system for cyclic master surgery scheduling with multiple objectives. *Journal of scheduling*, *12*(2), 147–161. https://doi.org/10.1007/s10951-008-0086-4

[61] Butler, D. B., & Maydell, U. M. (1979). Manpower scheduling in the edmonton police department. *INFOR: Information systems and operational research*, *17*(4), 366–372. https://doi.org/10.1080/03155986.1979.11731754

[62] Sinuany-Stern, Z., & Teomi, Y. (1986). Multi-objective scheduling plans for security guards. *Journal of the operational research society*, *37*(1), 67–77. https://doi.org/10.1057/jors.1986.9

[63] Taylor, P. E., & Huxley, S. J. (1989). A break from tradition for the San Francisco police: Patrol officer scheduling using an optimization-based decision support system. *Interfaces*, *19*(1), 4–24. https://doi.org/10.1287/inte.19.1.4

[64] Ernst, A., Hourigan, P., Krishnamoorthy, M., Mills, G., Nott, H., & Sier, D. (1999). Rostering ambulance officers. *Proceedings of the 15th national conference of the australian society for operations research, gold coast* (pp. 470–481). Gold Coast. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72397-4_3

[65] Rajagopalan, H. K., & Saydam, C. (2009). A minimum expected response model: formulation, heuristic solution, and application. *Socio-economic planning sciences*, *43*(4), 253–262. https://doi.org/10.1016/j.seps.2008.12.003

[66] Fernandez-Viagas, V., & Framinan, J. M. (2014). Integrated project scheduling and staff assignment with controllable processing times. *The scientific world journal*, *2014*(1), 924120. https://doi.org/10.1155/2014/924120

[67] Mould, G. I. (1996). Case study of manpower planning for clerical operations. *Journal of the operational research society*, *47*(3), 358–368. https://doi.org/10.1057/jors.1996.35

[68] Buffa, E. S., Krajewski, L. J., & Ritzman, L. P. (1977). Disaggregation in manufacturing and service organizations: survey of problems and research. *Decision sciences*, *8*(1), 1–18. https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1977.tb01064.x

[69] Rocha, M., Oliveira, J. F., & Carravilla, M. A. (2014). A constructive heuristic for staff scheduling in the glass industry. *Annals of operations research*, *217*, 463–478. https://doi.org/10.1007/s10479-013-1525-y

[70] Hasani-Goodarzi, A., Rabbani, M., & Manavizade, N. (2012). A novel mathematical model for manpower scheduling in break (relief) times in mixed model assembly lines. *Procedia-social and behavioral sciences*, *62*, 1371–1377. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.234

[71] SHAHNAZARI, S. P., TAVAKKOLI, M. R., & Kazemipoor, H. (2011). Solving a bi-objective manpower scheduling problem considering the utility of objective functions. https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2011.24.03b.05

[72] Savino, M. M., Brun, A., & Mazza, A. (2014). Dynamic workforce allocation in a constrained flow shop with multi-agent system. *Computers in industry*, *65*(6), 967–975. https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.02.016

[73] Lilly, M. T., Emovon, I., Ogaji, S. O. T., & Probert, S. D. (2007). Four-day service-staff work-week in order to complete maintenance operations more effectively in a Nigerian power-generating station. *Applied energy*, *84*(10), 1044–1055. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.02.012

[74] Yare, Y., & Venayagamoorthy, G. K. (2010). Optimal maintenance scheduling of generators using multiple swarms-MDPSO framework. *Engineering applications of artificial intelligence*, *23*(6), 895–910. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.05.006

[75] Eitzen, G. (1999). *Rostering multi-skilled employees efficiently and fairly: a column generation and constraint branching approach*. http://dx.doi.org/10.1023/B:ANOR.0000019087.46656.e2

[76] Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., & Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European journal of operational research*, *153*(1), 3–27. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00095-X

[77] Kazemipoor, H., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Shahnazari-Shahrezaei, P. (2013). Solving a novel multi-skilled project scheduling model by scatter search. *South african journal of industrial engineering*, *24*(1), 121–131. https://B2n.ir/eq9165

[78] Williams, H. P. (2013). *Model building in mathematical programming*. John Wiley & Sons. https://B2n.ir/zf8236

[79] Koppula, K., & Rodrigues, L. L. R. (2012). Job scheduling of nurse staffing: A dynamic programming approacH. *International journal of research in commerce, it & management*, *2*(1). https://B2n.ir/zk8087

[80] Clausen, T. (2010). A dynamic programming-based heuristic for the shift design problem in airport ground handling. https://B2n.ir/gw1150

[81] Burke, E. K., & Curtois, T. (2010). An ejection chain method and a branch and price algorithm applied to the instances of the first international nurse rostering competition, 2010. *Proceedings of the 8th international conference on the practice and theory of automated timetabling patat* (Vol. 10, p. 13). Queen's university belfast. https://B2n.ir/gq8796

[82] Brunner, J. O., & Bard, J. F. (2013). Flexible weekly tour scheduling for postal service workers using a branch and price. *Journal of scheduling*, *16*, 129–149. https://doi.org/10.1007/s10951-011-0265-6

[83] Shahnazari-Shahrezaei, P., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Kazemipoor, H. (2013). Solving a new fuzzy multi-objective model for a multi-skilled manpower scheduling problem by particle swarm optimization and elite tabu search. *The international journal of advanced manufacturing technology*, *64*, 1517–1540. https://doi.org/10.1007/s00170-012-4119-y

[84] Cai, Y., Zhang, Z., Guo, S., Qin, H., & Lim, A. (2013). A tree-based tabu search algorithm for the manpower allocation problem with timewindows and job-teaming constraints. *IJCAI* (pp. 496–502). IJCAI. https://www.ijcai.org/Proceedings/13/Papers/081.pdf

[85] Mohan, B. C., & Baskaran, R. (2012). A survey: Ant colony optimization based recent research and implementation on several engineering domain. *Expert systems with applications*, *39*(4), 4618–4627. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.076

[86] Iacopino, C., Palmer, P., Brewer, A., Policella, N., & Donati, A. (2013). EO constellation mps based on ant colony optimization algorithms. *2013 6th international conference on recent advances in space technologies (RAST)* (pp. 159–164). IEEE. https://doi.org/10.1109/RAST.2013.6581192

[87] Kazemipoor, H., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Shahnazari-Shahrezaei, P. (2002). Solving a mixed-integer linear programming model for a multi-skilled project scheduling problem by simulated annealing. *Management science letters*, *2*(2), 681–688. https://doi.org/10.5267/j.msl.2011.10.010

[88] Chan, F. T. S., Prakash, A., Ma, H. L., & Wong, C. S. (2013). A hybrid Tabu sample-sort simulated annealing approach for solving distributed scheduling problem. *International journal of production research*, *51*(9), 2602–2619. https://doi.org/10.1080/00207543.2012.737948

[89] Alfadilla, N., Sentia, P. D., & Asmadi, D. (2019, June). Optimization of nurse scheduling problem using genetic algorithm: a case study. In *IOP conference series: Materials science and engineering* (Vol. 536, No. 1, p. 012131). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012131

[90] Yang, F. C., & Wu, W. T. (2012). A genetic algorithm-based method for creating impartial work schedules for nurses. *International journal of electronic business management*, *10*(3), 182. https://B2n.ir/pn8755

[91] Gao, S. C., & Lin, C. W. (2013). Particle swarm optimization based nurses' shift scheduling. *Proceedings of the institute of industrial engineers asian conference 2013* (pp. 775–782). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-4451-98-7_93

[92] Glover, F. (1977). Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision sciences*, *8*(1), 156–166. https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1977.tb01074.x

[93] Glover, F. (1997). A template for scatter search and path relinking. *European conference on artificial evolution* (pp. 1–51). Springer. https://doi.org/10.1007/BFb0026589